



ISSN 0188-7297



DEFORMACIONES PERMANENTES EN MATERIALES GRANULARES PARA LA SECCION ESTRUCTURAL DE CARRETERAS

Paul Garnica Anguas
José Antonio Gómez López

**Publicación Técnica No. 176
Sanfandila, Qro, 2001**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Deformaciones permanentes
en materiales granulares
para la sección estructural
de carreteras**

**Paul Garnica Anguas
José Antonio Gómez López**

**Publicación Técnica No. 176
Sanfandila, Qro. 2001**

Este trabajo fue desarrollado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Dr. Paul Garnica Anguas y M. en I. José Antonio Gómez López.

Se contó con la participación del Técnico Mario Antonio Pérez González en la realización de las pruebas de laboratorio. La operación del marco de carga INSTRON estuvo a cargo del Ing. Luis Enrique Suárez y Araujo.

Indice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
1 Caracterización de la sollicitación en pavimentos	3
1.1 Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento	3
1.2 Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales	4
1.3 Influencia de la velocidad del vehículo en la duración de la aplicación de la carga	6
1.4 Mecanismo de deformación de un material granular sujeto a carga cíclica	7
1.5 Deformaciones permanentes en materiales granulares	11
2 Comportamiento observado en el estudio experimental	21
2.1 Descripción y características del material utilizado	21
2.2 Pruebas de calidad a los materiales utilizados en el estudio	21
2.3 Preparación de las muestras	23
2.4 Factores que influyen en la deformación permanente	25
3 Conclusiones	35
Referencias	37

Resumen

Se presentan los resultados de un estudio experimental destinado a arrojar luz sobre aspectos de la deformabilidad de materiales granulares comúnmente utilizados en la construcción de carreteras. En el trabajo se manejan granulometrías (tamaños máximos de partícula de 38 mm y mínimos de 0.074 mm) de un material basáltico triturado y con ellas se fabricaron especímenes de 30 cm de diámetro que fueron sometidos en laboratorio a repeticiones de carga en condiciones de compresión confinada. Se fabricaron los especímenes con granulometrías bien graduadas (GW) y uniformes (GP) y fueron colocados en condición suelta, para después ser sometidos a un proceso de deformación el cual consistió en la aplicación de diferentes niveles de esfuerzo que varían desde 275 kPa hasta valores de 1100 kPa con una frecuencia de un Hertz. Los esfuerzos aplicados permitieron analizar cual es la deformación permanente acumulada que presentan los materiales granulares cuando son sometidos a esfuerzos bajo carga repetida. Los resultados muestran que la deformación permanente a la que llega un material granular queda definida por el esfuerzo máximo que se le aplique. Cualquier número de repeticiones adicionales de un esfuerzo menor posteriormente aplicado o cualquier secuencia de esfuerzos crecientes que llegue al máximo previamente ejercido, ya no inducen deformaciones posteriores. Además, la estabilidad de una capa granular bajo carga repetida parece ser mayor en granulometrías uniformes que en granulometrías bien graduadas. Del estudio realizado parece desprenderse un criterio que permita recomendar niveles mínimos de compactación inicial de capas granulares sujetas a esfuerzos repetidos (caso de las carreteras) y a buscar granulometrías iniciales relativamente uniformes.

Abstract

This report presents the results of an experimental research on the study of the permanent deformation mechanism of granular materials subjected to repeated loading. The tests were performed in a dynamical load frame in conditions of confined compression. The samples were conformed by vibration into a mold; 30 cm in diameter and 50 cm in height. The range of vertical stress level employed was between 60 and 1100 kPa. In all tests it was observed a finite value of the cumulated permanent deformation where the magnitude dependent on the vertical stress level but not in the sequence of their application. Small changes in the initial void ratio can induce until a 100 % change in the final values of permanent deformation. It was also observed that well-graded materials seem to be more deformable under repeated loading. The key factor to control permanent deformation in granular materials appears to be the maximum vertical stress applied.

Resumen Ejecutivo

Se presentan los resultados de un estudio experimental destinado a arrojar luz sobre aspectos de la deformabilidad de materiales granulares comúnmente utilizados en la construcción de carreteras. En el trabajo se manejan granulometrías (tamaños máximos de partícula de 38 mm y mínimos de 0.074 mm) de un material basáltico triturado y con ellas se fabricaron especímenes de 30 cm de diámetro que fueron sometidos en laboratorio a repeticiones de carga en condiciones de compresión confinada. Se elaboraron los especímenes con granulometrías bien graduadas (GW) y uniformes (GP) y fueron colocados en condición suelta, para después ser sometidos a un proceso de deformación, el cual consistió en la aplicación de diferentes niveles de esfuerzo que varían desde 275 kPa hasta valores de 1100 kPa con una frecuencia de un Hertz. Los esfuerzos aplicados permitieron analizar cual es la deformación permanente acumulada que presentan los materiales granulares cuando son sometidos a esfuerzos bajo carga repetida.

En la primera parte de este trabajo se presentan algunos conceptos relacionados con la caracterización de las cargas en pavimentos, deformaciones permanentes en materiales granulares, así como al mecanismo de deformación que presentan cuando son sometidos a esfuerzos bajo carga repetida, también se mencionan los factores que influyen en la deformación permanente.

Se presenta una segunda parte en la que se describe y caracteriza al material utilizado en el estudio, así como la discusión y análisis de los resultados obtenidos de pruebas de deformaciones permanentes a material granular bajo carga repetida.

En el estudio se llegaron a conclusiones como las siguientes:

En el empleo de materiales granulares compactados el paradigma de diseño debe estar enfocado hacia la deformación permanente y no tanto a la resistencia.

La compactación inicial de una capa define la deformación permanente máxima bajo un esfuerzo repetido.

La estabilidad de una capa granular bajo carga repetida parece ser mayor en granulometrías uniformes (menores contenidos de partículas de tamaños comparativamente pequeños) que en granulometrías bien graduadas. Este hecho parece inducir a la conveniencia de aplicar normas más estrictas en el sentido que se desprende de lo anterior, en las curvas que normalmente se aceptan en las especificaciones de construcción de casi todas partes.

Los resultados muestran que la deformación que experimenta un material granular queda definida por el esfuerzo máximo aplicado. Cualquier número de repeticiones adicionales de un esfuerzo menor posteriormente aplicado o cualquier secuencia de esfuerzos crecientes que llegue al máximo previamente ejercido ya no inducen deformaciones posteriores.

Las deformaciones permanentes que experimentan los materiales granulares cuando son cargados con esfuerzos cíclicos es mayor que cuando son cargados con esfuerzos monotónicos, aún y aunque las cargas sean de larga duración.

De todo lo anterior parece desprenderse un criterio que induzca a potenciar la compactación inicial de capas granulares sujetas a esfuerzos repetidos (caso de las carreteras) y a buscar granulometrías iniciales relativamente uniformes. Esta conclusión final parece inducir los criterios a buscar materiales gruesos en capas granulares, relativamente resistentes a la degradación bajo carga repetitiva.

Introducción

El comportamiento mecánico de materiales granulares sin finos (tamaños mayores que la malla No. 200) tiende a ser objeto de interés creciente en aplicaciones diferentes como problemas de flujo de agua, licuación, filtros, etc., que de alguna manera se han venido manejando desde épocas anteriores. La atención actual se refiere al comportamiento masivo de esos materiales en cimentaciones, estabilidad de tierras y, particularmente, en problemas de diseño y construcción de pavimentos. Probablemente la preocupación más importante de la profesión no esté hoy en problemas de resistencia, puesto que se acepta que con un grado de compactación razonable, y fácil de proporcionar, se puede llegar a resistencias también razonables para muchos fines; quizá la preocupación mas central en torno al uso de esos materiales está en su deformabilidad, especialmente bajo cargas repetidas aún en casos en que éstas no sean espectacularmente grandes y estén notoriamente por debajo de límites de falla.

Actualmente los tráficos que resisten las carreteras exigen unas condiciones de rodamiento muy estrictas, so pena de caer en costos de operación muy elevados para las necesidades de cualquier sociedad. En este trabajo se presentan resultados destinados a arrojar luz sobre algunos aspectos de la deformabilidad de materiales granulares (en la investigación, tamaño máximo de 38 mm), seleccionados hasta el tamaño correspondiente a la malla No. 200 (0.074 mm), que tradicionalmente se ha considerado como el límite superior de los suelos “finos”.

En el trabajo se manejan cuatro granulometrías de un material basáltico triturado artificialmente, dos con granulometría uniforme y dos con granulometría bien graduada. Las cuatro variantes del material fueron sometidas en laboratorio a repeticiones de carga en condiciones de compresión confinada, utilizando una máquina universal INSTRON.

En todos los casos se utilizó una frecuencia de 1 ciclo por segundo y se hizo variar en los diferentes ensayos el número de tales ciclos y la magnitud de la carga aplicada bajo la que se produjo la vibración.

El trabajo consta de tres capítulos, como se presenta a continuación:

El capítulo uno comprende conceptos relacionados con deformaciones permanentes en materiales granulares, lo relacionado al mecanismo de deformación que experimenta un material granular bajo carga repetida, así como los factores que influyen en la deformación permanente.

El capítulo dos describe las características y calidad del material utilizado así como el procedimiento de prueba, además del equipo utilizado para la determinación del comportamiento esfuerzo deformación del material granular ensayado en compresión confinada. En este mismo capítulo se presentan y analizan los resultados de deformación permanente obtenidos.

En el capítulo tres se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes obtenidas a partir de los análisis realizados a las diferentes partes que integran la presente investigación.

Al final se presenta la bibliografía utilizada.

1 Caracterización de la sollicitación en pavimentos

1.1 Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes.

El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tráfico de vehículos es muy complejo. Un elemento en un pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzo normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. El esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales.

En general, puede hacerse la siguiente consideración en cuanto a la evolución de la magnitud en el tiempo, del esfuerzo que los vehículos inducen a un punto en o bajo el pavimento: cuando la rueda del vehículo se encuentra alejada del punto considerado, el esfuerzo en dicho punto es el debido al peso de tierra; a medida que la rueda se acerca, a velocidad constante, el esfuerzo vertical se incrementa hasta llegar a un máximo en el momento en que la rueda se encuentra directamente sobre el punto considerado; al avanzar el vehículo, la rueda se aleja del punto, generando una disminución del esfuerzo vertical sobre el pavimento, reduciendo su magnitud hasta desaparecer completamente. El proceso descrito se ilustra en la Figura 1.1.

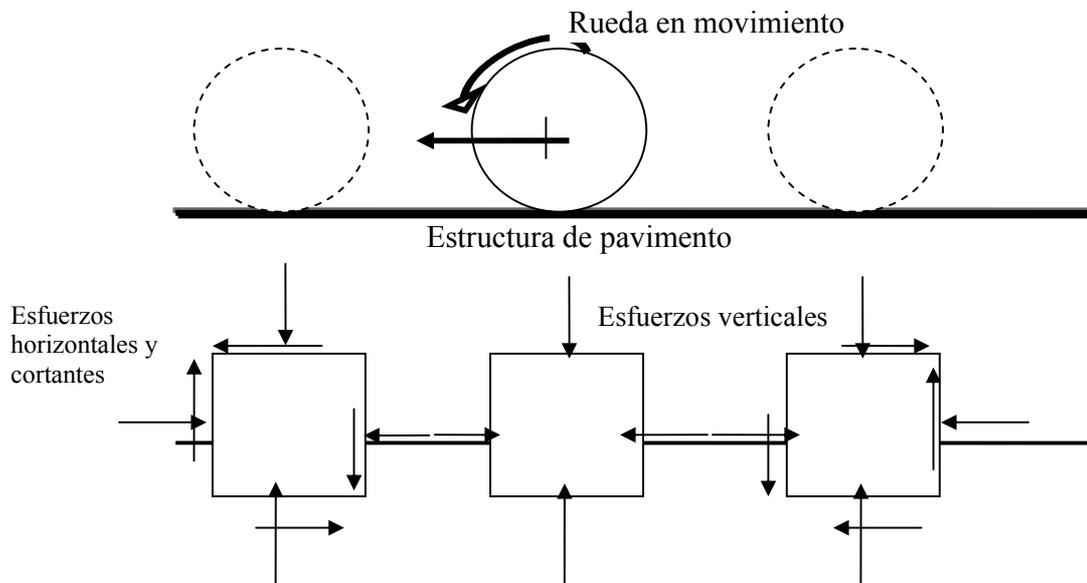


Figura 1.1 Esfuerzos en un elemento de pavimento bajo una carga en movimiento (Brown, 1996)

En la Figura 1.1, se aprecia el sentido que toman los esfuerzos, tanto cortantes como normales con el paso de la carga, la cual es transmitida por una rueda en movimiento.

Se aprecia en la Figura 1.2 cómo el esfuerzo cortante aumenta a medida que la rueda avanza, hasta llegar a un valor máximo, para decrecer hasta un valor de cero en el momento en que el esfuerzo vertical es máximo e incrementarse nuevamente pero ahora con signo contrario hasta lograr un máximo, para luego disminuir hasta llegar a cero, describiendo una onda senoidal completa. También se muestra el desarrollo de los esfuerzos horizontales inducidos al elemento de suelo, por la aplicación de las cargas del tránsito. El proceso descrito anteriormente se desarrolla de manera cíclica al paso repetido de una cantidad de ejes vehiculares que depende del nivel de ocupación de cada obra vial.

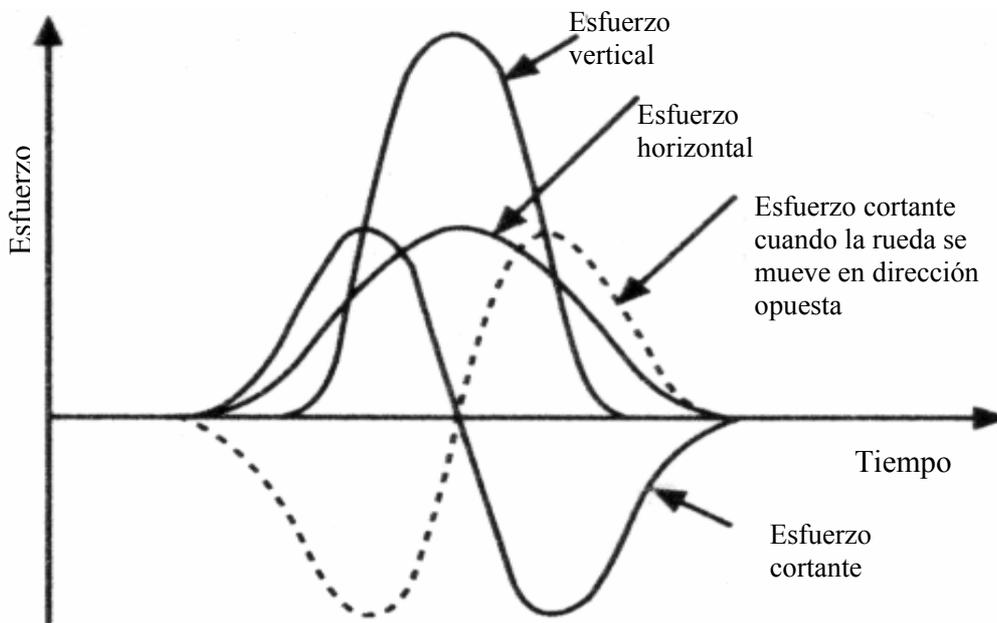


Figura 1.2 Variación de los esfuerzos con el tiempo (Brown, 1996)

1.2 Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales

Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de dichos materiales.

Brown, 1996, reporta gráficas de esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante la instrumentación de una estructura de pavimento sujeta a la aplicación de carga repetida por

medio del paso de un tractocamión. Las Figuras 1.3 y 1.4 corresponden a las mediciones antes mencionadas.

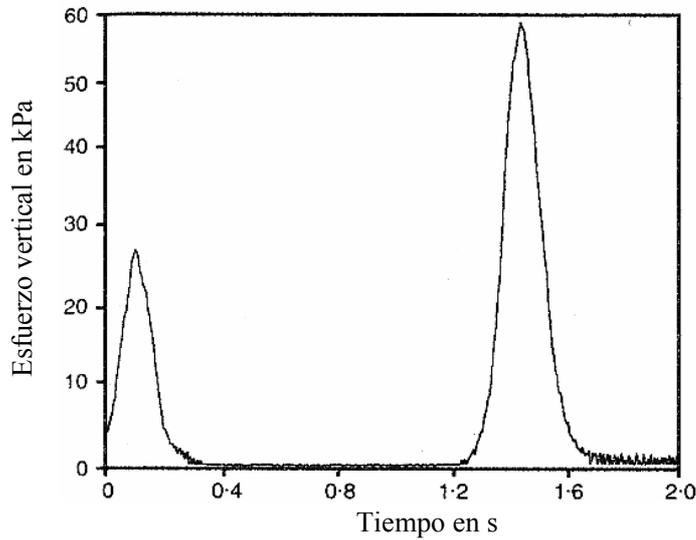


Figura 1.3 Valores de esfuerzos medidos en tramos experimentales (Brown, 1996)

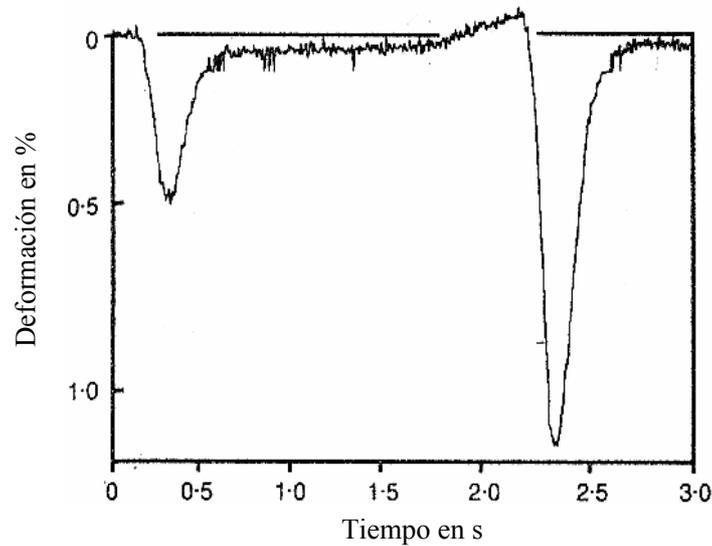


Figura 1.4 Valores de deformaciones medidas en tramos experimentales (Brown, 1996)

En las gráficas puede apreciarse la evolución de la magnitud del esfuerzo y la deformación conforme el eje de carga se aproxima al punto considerado para la medición y cómo decrece al irse alejando del punto instrumentado.

El nivel de los esfuerzos y deformaciones depende de varios factores como la magnitud de la carga aplicada y las características de los materiales que conforman el pavimento, principalmente.

1.3 Influencia de la velocidad del vehículo en la duración de la aplicación de la carga

Con base en investigaciones como las mencionadas en los puntos anteriores, parece razonable suponer que los pulsos de esfuerzo que una rueda de carga en movimiento, induce a un pavimento se aproxima a una función de tipo senoidal o triangular, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto en o bajo el pavimento, en el cual se realiza la medición.

Barksdale (citado en Huang, 1993), investigó los pulsos de esfuerzo vertical en diferentes puntos dentro de una estructura de pavimento flexible, encontrando que el tiempo de duración del pulso de carga puede relacionarse con la velocidad del vehículo y con la profundidad del punto considerado, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 1.5.

Puede apreciarse claramente que, en general, el tiempo de duración del pulso de carga se incrementa a medida que la velocidad del vehículo disminuye. La figura muestra también que el tiempo del pulso se incrementa al aumentar la profundidad del punto considerado en la estructura para la medición.

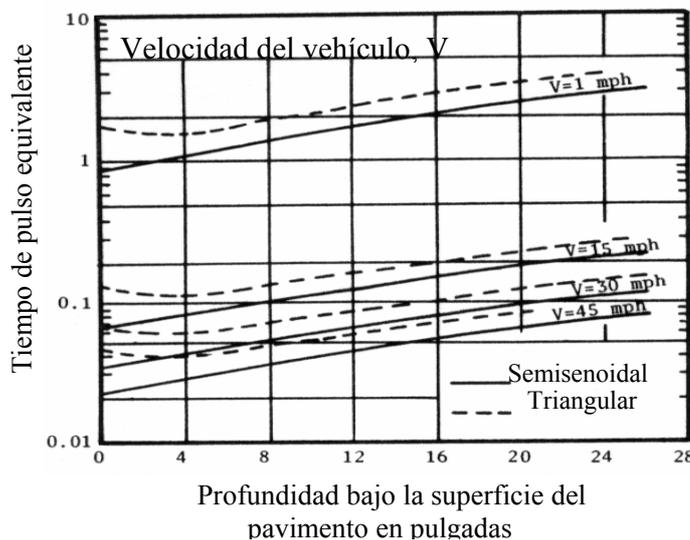


Figura 1.5 Tiempo de aplicación de la carga bajo una onda semisenoidal o triangular (Huang, 1993)

Huang (1993) menciona que debido a la gran variación en la velocidad de los vehículos y debido también a que las profundidades o espesores de las capas de material de una

estructura de pavimento no se conocen con exactitud en las etapas de diseño, es recomendable usar para el análisis una onda semisenoidal con una duración de 0.1 s y un período de reposo de 0.9 s. Se afirma también que la duración de la aplicación de la carga tiene muy poco efecto en el módulo resiliente de los materiales granulares y algún efecto en suelos finos, dependiendo de su contenido de agua, y un efecto considerable en materiales asfálticos.

1.4 Mecanismo de deformación de un material granular sujeto a carga cíclica

Un material granular sujeto a carga cíclica, experimenta una deformación cuya magnitud es función de varios factores como el nivel de la carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del propio material, etc. La deformación total, tiene dos componentes: una definida como deformación recuperable o elástica, la cual es medible una vez que la carga deja de actuar sobre el material; la otra componente, denominada deformación permanente, se define como “la deformación vertical no recuperable (plástica) que experimenta un material de espesor definido, en cada ciclo de carga aplicado”, lo anterior se muestra en la Figura 1.6.

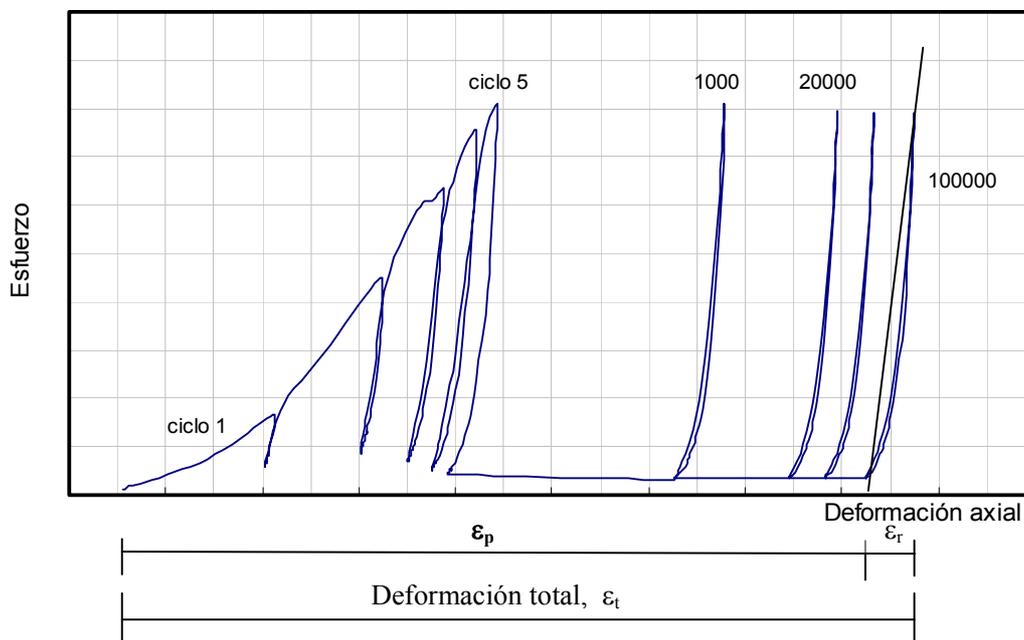


Figura 1.6 Acumulación de la deformación con el número de ciclos en materiales granulares

Es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiendo considerarse elástica (Huang, 1993).

En los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica, ϵ_p , en la Figura 1.6. Al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece. Después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable, como lo indica la deformación recuperable, ϵ_r , llegando a una condición de equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla.

El máximo esfuerzo desviador asociado a esta condición es denominado “Esfuerzo Umbral” y es un concepto importante para el diseño. La Figura 1.7 ilustra este concepto (Brown, 1994).

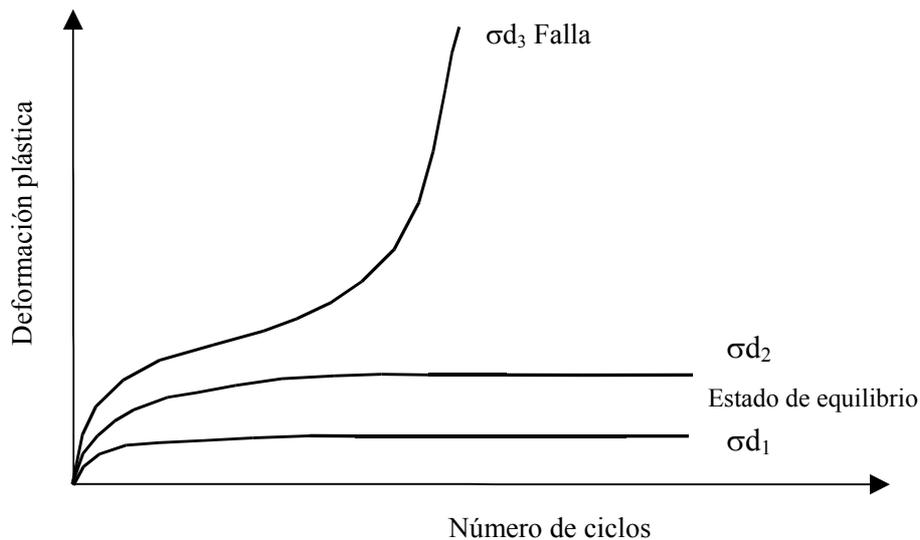


Figura 1.7 Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida (Brown, 1994)

En la Figura 1.7 se aprecia cómo para un esfuerzo desviador muy alto, la velocidad de acumulación de la deformación plástica puede incrementarse conduciendo al espécimen de prueba a la falla.

Brown y Selig (citados en Brown, 1994) han sugerido que el esfuerzo umbral para materiales granulares puede expresarse como la relación entre el esfuerzo pico y el de falla. Proponen aplicar un esfuerzo desviador equivalente al 70% del de falla, como la relación máxima de esfuerzos para minimizar el desarrollo de deformación plástica.

En la Figura 1.8 se muestran las componentes de la deformación que un material experimenta al ser sometido a un esfuerzo vertical repetido, en las primeras aplicaciones de carga. En la figura, el segmento AC representa la deformación unitaria total del material ϵ_t , la línea AB indica la magnitud de la deformación permanente ϵ_p , y la línea BC corresponde a la deformación recuperable ϵ_r , también llamada deformación resiliente. El segmento AE del eje vertical indica la magnitud del esfuerzo aplicado al material, el cual le ha provocado las deformaciones descritas.

La figura corresponde a una curva típica de los datos obtenidos en los primeros ciclos de carga de una prueba de compresión dinámica; sin embargo, conforme el número de ciclos se incrementa, la magnitud de la deformación permanente en cada ciclo disminuye hasta que prácticamente desaparece, momento en el cual la deformación que el material experimenta es casi en su totalidad de tipo elástico o resiliente, condición en la cual el material es considerado en estado resiliente, permitiendo, en esas condiciones, determinar un importante parámetro del material denominado “Módulo de Resiliencia”.

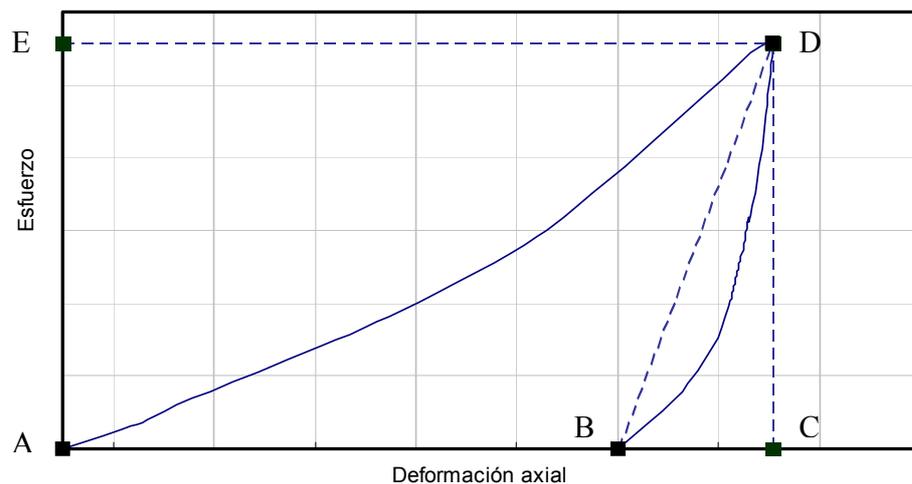


Figura 1.8 Comportamiento esfuerzo-deformación en los ciclos iniciales de carga, material granular en estado no resiliente

La Figura 1.9 muestra la gráfica que resulta al trabajar los datos obtenidos de una prueba de compresión dinámica (cíclica) en un ciclo de carga aplicado a un material cuya deformación total es resiliente, esto es, que el suelo tiene comportamiento resiliente.

En la gráfica la línea AB representa la deformación unitaria resiliente o recuperable ϵ_r , que para esta condición corresponde a la total ϵ_t ; la línea AD indica el esfuerzo aplicado al suelo, en ese pulso o ciclo.

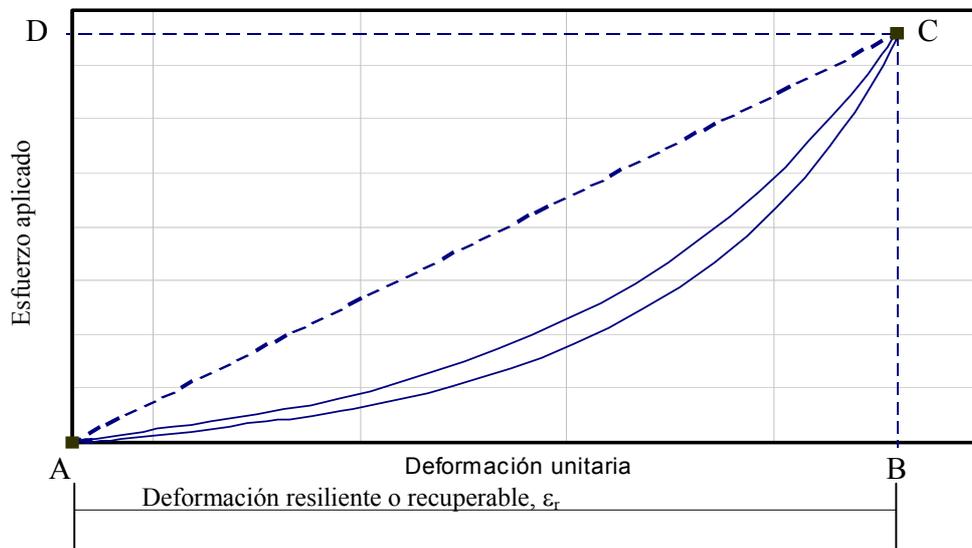


Figura 1.9 Comportamiento esfuerzo-deformación en un ciclo de carga, material granular en estado resiliente

La Figura 1.10 muestra el proceso de acumulación de la deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica, al aumentar el número de ciclos, para un esfuerzo de magnitud constante.

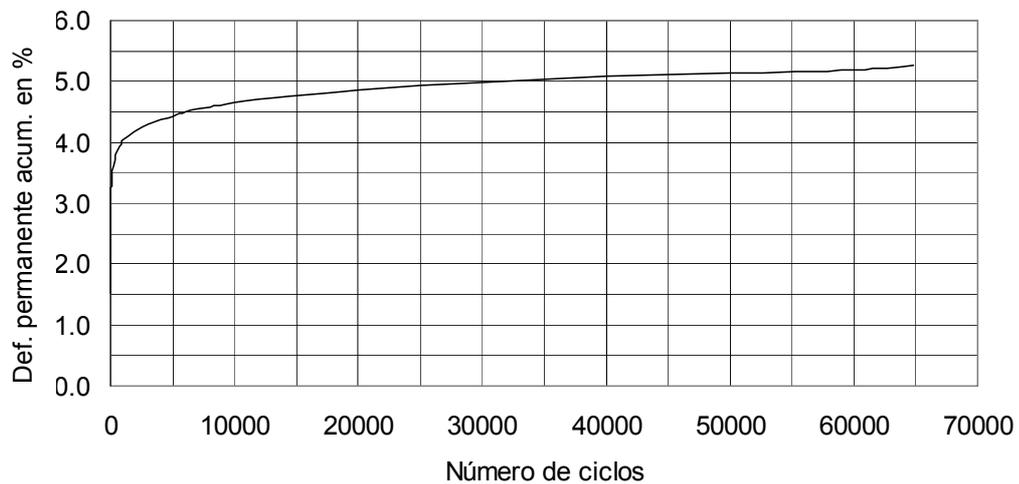


Figura 1.10 Acumulación de deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica

En la figura anterior se aprecia que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta en las primeras decenas de ciclos de

carga, y en ella se produce aproximadamente el 70% de la deformación total. Posteriormente se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de aplicación de la carga. Finalmente se alcanza una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente tiende a su máximo valor. A partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene prácticamente ningún efecto adicional.

1.5 Deformaciones permanentes en materiales granulares

Uno de los factores más importantes en la caracterización de los materiales de pavimentación es la deformación permanente que experimentan por efecto de la repetición de cargas, este factor es quizá el más importante a considerar, si se toma en cuenta que, en la mayoría de los casos, los pavimentos llegan a la falla debido al grado de deformación que han sufrido, disminuyendo su calidad de servicio a niveles de rechazo. Por lo anterior, en los estudios de materiales para pavimentación debe ponerse especial énfasis en la determinación de las características de deformación permanente.

Una de las formas de deterioro más fuertemente asociada a los mecanismos de falla de los pavimentos flexibles es la formación de roderas, las cuales se generan por la acumulación de deformación permanente en la superficie, que puede, en principio, incluir contribuciones de todas las capas del pavimento.

La Figura 1.11 ilustra la formación de roderas en un pavimento asfáltico, señalando las deformaciones de las diferentes capas, que contribuyen a la deformación permanente total en la superficie del pavimento, indicada como profundidad de rodera.

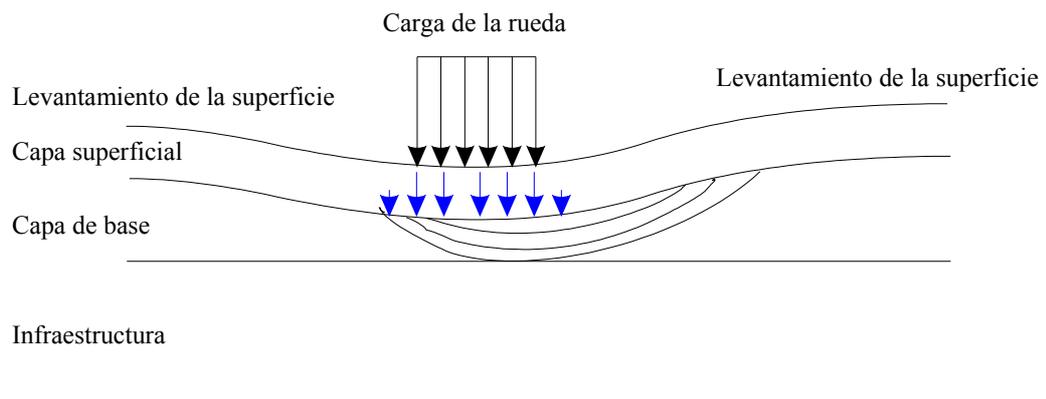


Figura 1.11 Mecanismo de formación de roderas en un pavimento asfáltico

La Figura 1.12 muestra las mediciones de la deformación permanente desarrollada a lo largo de 4 años, en las diferentes capas de un pavimento asfáltico (Brown, 1996).

Puede apreciarse en la figura, la deformación total medida en la superficie y la contribución de cada una de las capas a la deformación total de la estructura.

Brown (1996) señala que en pavimentos con capas asfálticas gruesas, generalmente las roderas se generan por las deformaciones permanentes en estas capas; pero en pavimentos con carpetas delgadas, las capas granulares y la subrasante son las que provocan la mayor parte de la deformación, principalmente si las condiciones de drenaje son inadecuadas.

En algunos tramos de prueba construidos en Bothkennar (Brown, 1996), la capa de material granular contribuyó con una tercera parte de la profundidad de la rodera; pero hubo tramos en donde la totalidad de la profundidad de las roderas fue generada por la deformación de la capa subrasante.

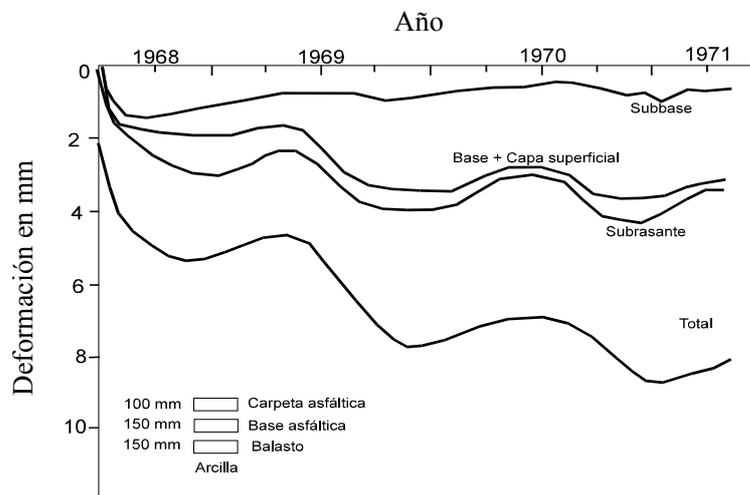


Figura 1.12 Deformaciones permanentes medidas en un período de cuatro años en tramo experimental

La acumulación de deformación plástica o permanente de materiales granulares bajo carga repetida ha recibido relativamente menos atención experimental que las relaciones esfuerzo-deformación resilientes. Esto se debe, en parte, a que los experimentos se realizan con pruebas destructivas y se requiere ensayar mucho más especímenes para obtener información adecuada.

M.A. Kamal reporta resultados de deformación permanente obtenidos de las pruebas de carga repetida practicadas a un material granular preparado con 8 diferentes granulometrías cuyas curvas se muestran en las Figuras 1.13 a) y 1.13 b).

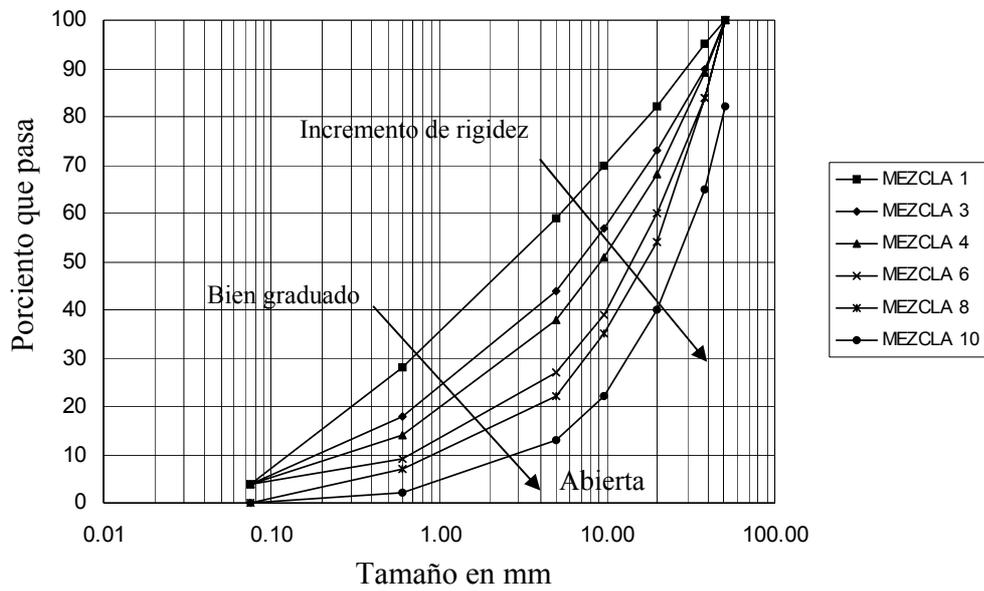


Figura 1.13 a) Granulometrías utilizadas en los ensayos

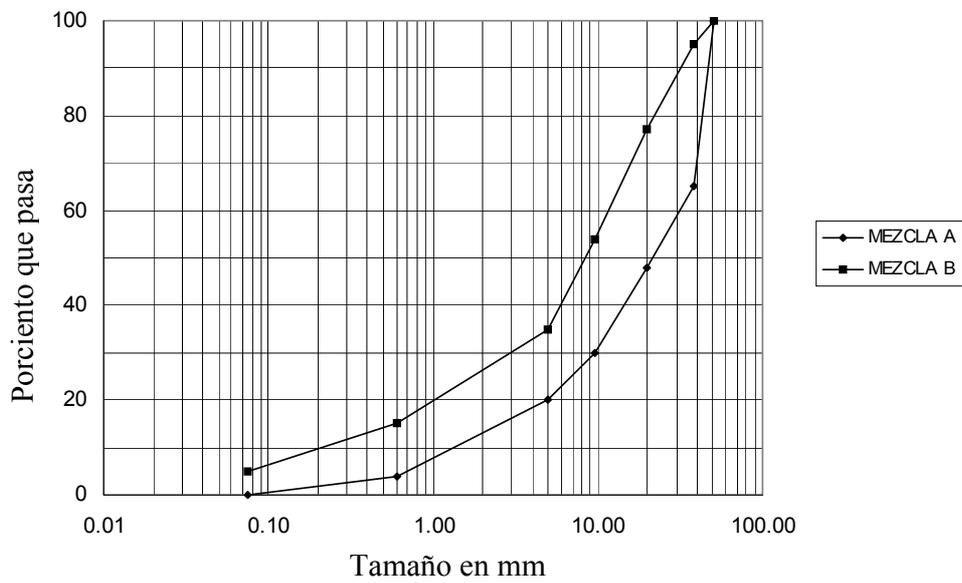


Figura 1.13 b) Límites de la zona granulométrica especificada

El comportamiento plástico del material bajo carga repetida, se estudió aplicando un esfuerzo desviador repetido y midiendo la deformación no recuperable en cada ciclo, antes de realizar el programa de pruebas de comportamiento elástico.

Los resultados obtenidos en el material preparado con las 8 diferentes granulometrías se muestran en la Figura 1.14.

En la figura puede apreciarse que la resistencia a la deformación permanente es, generalmente, mayor en los materiales bien graduados en comparación con los materiales uniformes.

Después de realizar los ensayos de comportamiento elástico, las muestras fueron sometidas nuevamente a un proceso de carga repetida con el fin de investigar la velocidad de acumulación de deformación permanente antes y después de las pruebas de comportamiento elástico.

La deformación permanente fue medida durante la aplicación de 10,000 repeticiones de carga, encontrándose que en todos los materiales, la velocidad de acumulación de deformación fue insignificante comparada con los valores medidos antes de las pruebas de deformación elástica. Sin embargo, se encontró que los resultados concuerdan con los trabajos de Morgan (citado en M.A. Kamal, et al) que muestran que aún para 10^6 ciclos de carga, el material no logra un comportamiento totalmente estable.

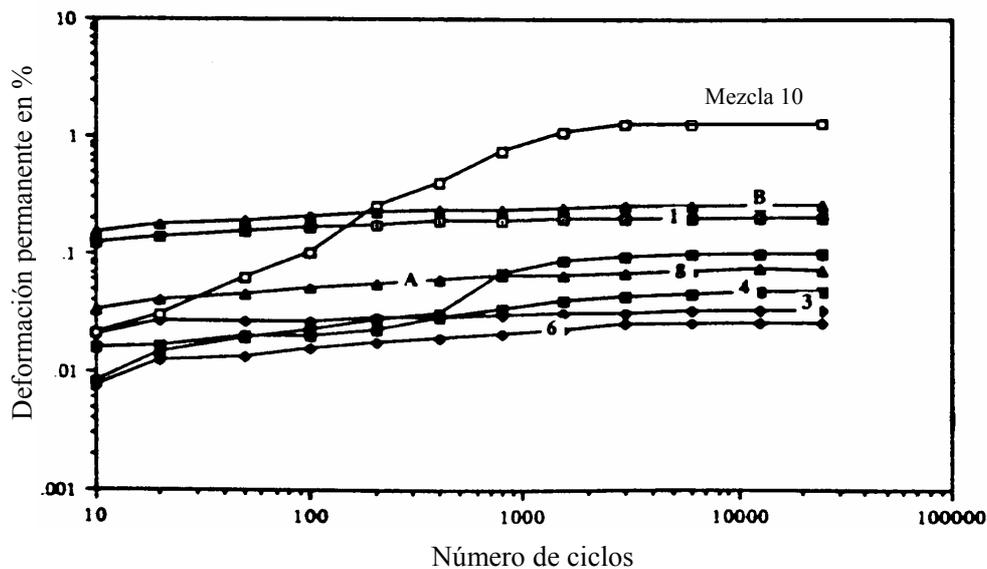


Figura 1.14 Deformación permanente contra número de ciclos de carga aplicados

En la mayoría de los problemas de Mecánica de Suelos que involucran el análisis de las estructuras, se han hecho intentos para caracterizar al suelo como un material elasto-plástico (Brown, 1994). Con ésto se reconoce que tanto las deformaciones elásticas como las plásticas son importantes, pero, generalmente, son las primeras a las que se les pone mayor atención. Como la mayoría de los problemas involucran cargas monotónicas, la deformación recuperable o elástica no llega a ser un resultado significativo. Para el diseño de pavimentos es usual enfatizar la respuesta resiliente, porque, por definición las

deformaciones plásticas significativas no están permitidas y la naturaleza de la carga repetida en el problema, enfatiza las deformaciones recuperables.

El agrietamiento por fatiga, en la carpeta asfáltica, se inicia cuando la deformación resiliente por tensión es del orden de 100 a 300 microdeformaciones (10^{-6}), mientras la formación de roderas de profundidad importante se asocia con deformaciones plásticas acumuladas del 1 al 2%. En términos de Mecánica de Suelos, la ingeniería de pavimentos es un problema de pequeñas deformaciones (Brown, 1994).

Modelos constitutivos

Ha habido muchos intentos por establecer procedimientos para predecir la deformación permanente de materiales granulares. Algunos investigadores han reportado que la velocidad de acumulación de la deformación permanente bajo carga repetida disminuye con el número de aplicaciones de carga.

Barksdale (citado en Fredrik Lekarp, et al) realizó un estudio muy completo del comportamiento de diferentes materiales granulares usados comúnmente como bases de pavimento, mediante pruebas triaxiales cíclicas, aplicando 10^5 repeticiones de carga. Con base en los resultados obtenidos expresó las relaciones entre la deformación permanente y el número de ciclos de carga mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{l,p} = a + b \log N \quad (1.1)$$

donde: $\varepsilon_{l,p}$ = deformación axial permanente acumulada
 N = número de repeticiones de la carga
 a, b = parámetros de ajuste

Sweere (citado en Fredrik Lekarp, et al) realizó pruebas triaxiales cíclicas aplicando 10^6 repeticiones de carga y encontró que la expresión de Barksdale no ajustaba sus resultados y sugirió entonces que para cantidades muy grandes de aplicaciones de carga debía aplicarse la expresión doble logarítmica siguiente:

$$\log(\varepsilon_{l,p}) = a + b \log N \quad (1.2)$$

donde los términos tienen el mismo significado que en el modelo de Barksdale.

Pappin (citado en Fredrik Lekarp et al) describe la deformación permanente axial como una función de la relación de esfuerzos q/p (donde q es el esfuerzo desviador y p el esfuerzo normal medio) y la duración de la trayectoria de esfuerzos.

Varios estudios sugieren considerar una relación directa entre la deformación permanente axial y la relación de esfuerzos $q_{m\acute{a}x}/\sigma_3$, donde $q_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo desviador máximo y σ_3 es el esfuerzo de confinamiento. Barret and Smith (1976) y Raymond and Williams (1978), (citados en Fredrik Lekarp, et al), sugieren usar la relación de esfuerzos $q_{m\acute{a}x}/q_{falla}$ para

estimar la deformación permanente. Thom (citado en Fredrik Lekarp, et al) señala que la deformación permanente acumulada puede calcularse mejor si se aplica la relación de esfuerzos siguiente:

$$(q_{falla} - q_{m\acute{a}x.}) / q_{falla}$$

En estudios desarrollados en Francia, Paute (citado en Fredrik Lekarp et al) utilizó un modelo matemático para expresar la influencia del número de aplicaciones de carga y el nivel de esfuerzos en el desarrollo de la deformación permanente en materiales granulares.

De acuerdo con el modelo de Paute, el cual está basado en pruebas triaxiales con presión de confinamiento cíclica y 80,000 repeticiones de carga, la deformación permanente axial en un material granular puede expresarse como:

$$\varepsilon_{ip}(N) = \varepsilon_{i,p}(100) + \varepsilon^*_{ip}(N) \quad (1.3)$$

donde:

$$\varepsilon^*_{ip}(N) = A[1 - (N/100)^{-B}]$$

$\varepsilon_{ip}(N)$ = deformación axial permanente total

$\varepsilon_{ip}(100)$ = deformación axial permanente acumulada durante los primeros 100 ciclos.

$\varepsilon^*_{ip}(N)$ = deformación axial permanente adicional, para $N > 100$.

N = número de ciclos de carga

A, B = parámetros de regresión (ajuste)

MODELO DE MONISMITH (1975) (citado en Ramón Bonaquist, et al)

$$\varepsilon_p = a_1 N^{a_2} \quad (1.4)$$

donde: ε_p = deformación plástica acumulada

N = número de aplicaciones de carga

a_1 y a_2 = parámetros de ajuste

METODO DE VESYS (FHWA, 1978)

El método incorporado al programa de computadora VESYS para la predicción de la profundidad de rodera está basado en la suposición de que la deformación permanente es proporcional a la deformación resiliente y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_p(N) = \mu \varepsilon N^{-\alpha} \quad (1.5)$$

En esta expresión $\varepsilon_p(N)$ es la deformación plástica o permanente debida a la aplicación de la carga en el ciclo N ; ε es la deformación resiliente o elástica en la repetición de carga número 200; N es el número de aplicación de carga; μ es un parámetro de deformación

permanente que representa la constante de proporcionalidad entre las deformaciones permanente y elástica y, α es un parámetro de deformación permanente que indica la velocidad con que disminuye la deformación permanente al incrementar el número de aplicaciones de carga.

Factores que influyen en la magnitud de la deformación permanente

Brown (1996) presenta información obtenida de trabajos experimentales realizados en Sudáfrica, utilizando un simulador de vehículo pesado (HVS), el cual se hizo circular sobre un modelo a escala natural, continuamente durante varias semanas, a fin de simular el número de cargas de tráfico equivalente a varios años. Se emplearon varias técnicas básicas para investigar cómo se deterioraron los pavimentos por efecto del régimen de carga aplicado. Se excavaron trincheras cuidadosamente y se examinaron cada una de las capas después de cada período de carga de tráfico, lo que permitió monitorear los mecanismos de falla desarrollados. La gran cantidad de información generada por el programa de pruebas del HVS formó las bases del sistema de diseño de pavimentos de Sudáfrica.

En uno de los experimentos realizados se midió la acumulación de deformación permanente de 4 materiales granulares de calidad diferente, a los cuales, durante el proceso de aplicaciones de carga, se les inyectó agua, controlando las condiciones de drenaje a fin de conocer la influencia de un drenaje efectivo en el comportamiento de los materiales.

La Figura 1.15 muestra la evolución de la acumulación de deformación permanente con el número de aplicaciones de carga para 4 materiales granulares de diferente calidad, a los cuales se les inyectó agua a partir de un cierto número de repeticiones de la carga.

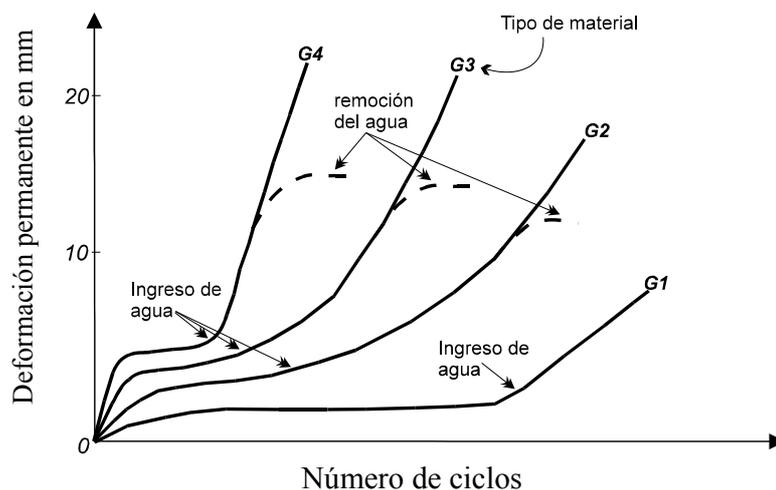


Figura 1.15 Influencia del agua, drenaje y tipo de material granular en la acumulación de deformación permanente (Brown, 1996)

En la figura anterior se aprecia la ventaja de utilizar materiales de buena calidad como el G1, correspondiente a una roca triturada. También se muestra, por medio de las líneas discontinuas, la influencia positiva de un drenaje efectivo.

Fredrik Lekarp et al, analizaron la influencia del número de ciclos de carga aplicados y del nivel de esfuerzos en la deformación permanente que experimentan 5 materiales granulares en pruebas triaxiales cíclicas. La granulometría de los materiales utilizados en el estudio se ilustra mediante la Figura 1.16. La Tabla 1.1 presenta los pesos volumétricos y contenidos de agua.

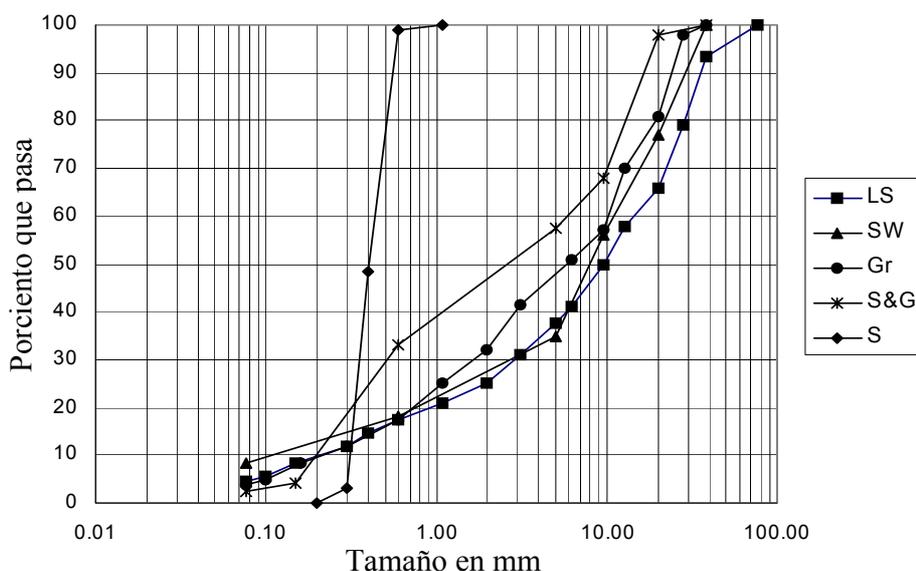


Figura 1.16 Granulometrías de los materiales ensayados

Tabla 1.1 Propiedades de los materiales ensayados

Material	Propiedades in situ		Resultados de laboratorio		Propiedades de las muestras		
	Peso vol. seco (g/cm ³)	Humedad (%)	Peso vol. seco máximo (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	Peso vol. Seco (g/cm ³)	Humedad antes de la prueba (%)	Humedad después de la prueba (%)
LS	2.26	5.0	2.38	7.6	2.26	5.0	4.7
Gr	2.09	1.9	2.14	2.4	2.09	1.9	1.8
SW	---	---	2.23	6.6	2.16	4.6	3.8
S y G	2.05	4.0	2.20	4.9	2.05	4.0	3.7
S	---	---	---	---	1.52	0	0

La Figura 1.17 muestra la evolución de la deformación permanente con el número de aplicaciones de carga, en cada uno de los 5 materiales estudiados.

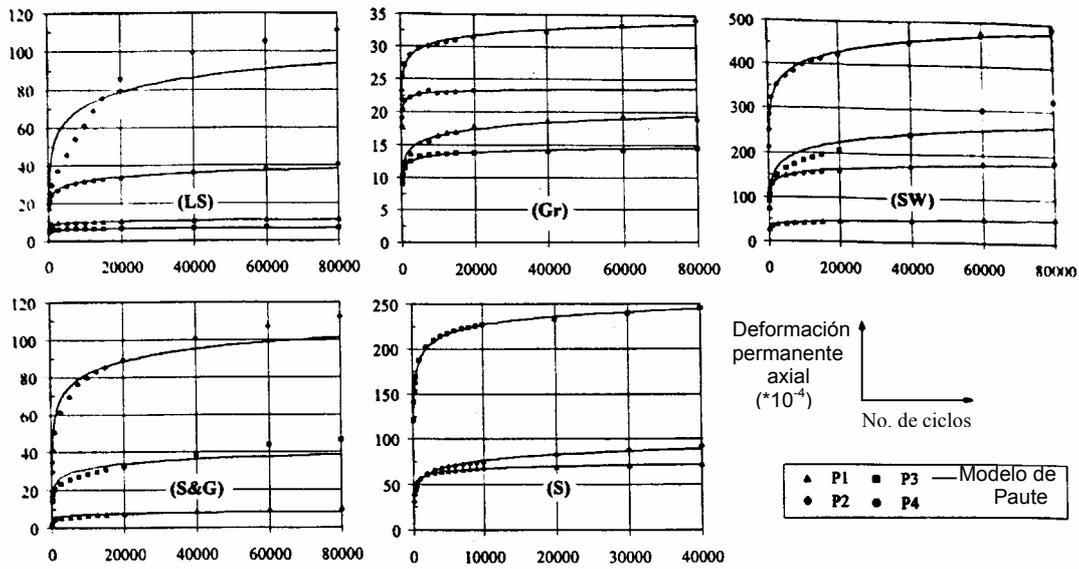


Figura 1.17 Deformación permanente axial contra número de repeticiones de carga

En la figura anterior se aprecia claramente cómo la magnitud de la deformación permanente acumulada varía en forma directa con el número de ciclos de carga, mostrando además que la velocidad de acumulación de la deformación permanente decrece con el número de repeticiones de carga. La deformación permanente parece incrementarse en forma asintótica hacia un valor límite.

Se aprecia también una marcada influencia del nivel de esfuerzos en la deformación permanente. En la Tabla 1.2 se muestran los esfuerzos correspondientes a cada una de las curvas de la Figura 1.17.

En general, se aprecia que a medida que la suma de esfuerzos principales θ aumenta, se incrementa la magnitud de la deformación permanente alcanzada en cada uno de los materiales. Este estudio también permite observar la influencia que tiene la naturaleza de los materiales en el desarrollo de deformación permanente, lo cual se puede apreciar analizando la escala del eje vertical de cada una de las figuras.

Los puntos indicados con símbolos (figuras geométricas) corresponden a los valores de deformación permanente obtenidos de las pruebas de carga cíclica realizados, mientras que las gráficas de línea continua son las que resultan de aplicar el modelo de Paute (citado en Fredrik Lekarp, et al) para predecir deformaciones permanentes en materiales granulares bajo carga cíclica.

Tabla 1.2. Esfuerzos aplicados en las pruebas de carga cíclica

Material	Secuencia	Q _{máx} kPa	P _{máx} kPa
Gr	P1	292.70	112.10
	P2	595.40	245.50
	P3	293.10	169.20
	P4	585.60	310.20
LS	P1	296.15	117.53
	P2	592.99	48.23
	P3	298.13	71.40
	P4	594.36	114.53
SW	P1	295.40	117.60
	P2	589.40	292.50
	P3	591.50	388.10
	P4	295.40	170.00
SyG	P1	198.00	199.30
	P2	498.10	429.00
	P3	395.70	346.50
S	P1	78.80	96.20
	P2	91.00	98.90
	P3	103.40	101.10

2 Comportamiento observado en el estudio experimental

2.1 Descripción y características del material utilizado

El material pétreo utilizado en esta investigación, es producto de la trituración de roca basáltica color gris oscuro, procedente del banco denominado “El Tlacote”, el cual se localiza a la izquierda del km 9+000 de la carretera Querétaro-El Tlacote, en el municipio de Querétaro, Qro. Por las características de la formación rocosa, para la obtención de los materiales de construcción mencionados, se requiere someterla a un proceso de trituración total.

Para realizar los trabajos experimentales se procedió a tomar una muestra representativa del material producido en el banco, el cual es triturado a un tamaño máximo de 38.1 mm (1½”) y con las características granulométricas correspondientes a materiales para base de pavimento.

A dicho material se le practicaron las pruebas de calidad indicadas en las Normas de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1986), así como las recomendadas por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 1991).

2.2 Pruebas de calidad a los materiales utilizados en el estudio

Las características del material fueron determinadas mediante la metodología establecida en normas oficiales (SCT), complementando el análisis con otras pruebas de interés que permitieron caracterizarlo más ampliamente a fin de poder juzgar su comportamiento en ensayos de carga cíclica, estableciendo las correlaciones de éste con sus características de granulometría, forma de las partículas, estabilidad interna, rotura de granos y relación de vacíos, entre otras.

En la Tabla 2.1, se muestran en forma condensada los resultados obtenidos de las pruebas de calidad a que fue sometido el material en estudio.

En la Figura 2.1 se presentan las curvas granulométricas utilizadas en los ensayos de deformaciones permanentes. Las curvas corresponden a dos materiales bien graduados, G1 y G4, y a dos materiales uniformes, G2 y G3. Como puede observarse, los materiales estudiados no contienen finos, condición que se manejó debido a que se partió de la hipótesis de que los materiales sin finos tienen mejor comportamiento como base de pavimento.

En la Figura 2.2 se presentan las zonas granulométricas propuestas por el Instituto Mexicano del Transporte (Rico et al 1991) para materiales de base de pavimento, al mismo

tiempo puede observarse la ubicación de los materiales estudiados (granulometrías G1, G2, G3 y G4).

Tabla 2.1 Valores de calidad del material utilizado en el estudio

PRUEBA	PORCENTAJE
Desgaste de "Los Angeles"	16.0
Peso específico relativo de sólidos	2.70
Absorción	1.70
Partículas planas	35.0
Partículas alargadas	57.0
Intemperismo acelerado (Na ₂ SO ₄)	5.10

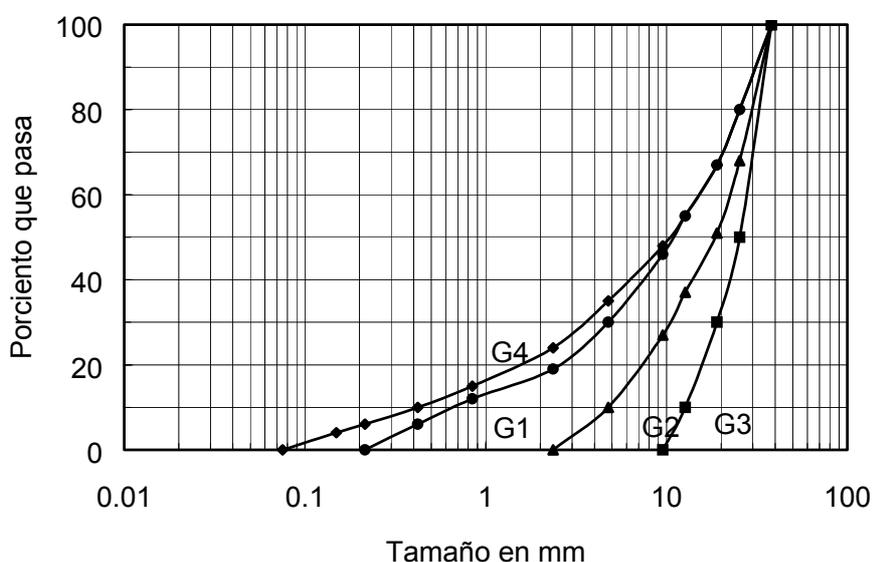


Figura 2.1 Curvas granulométricas de los materiales estudiados

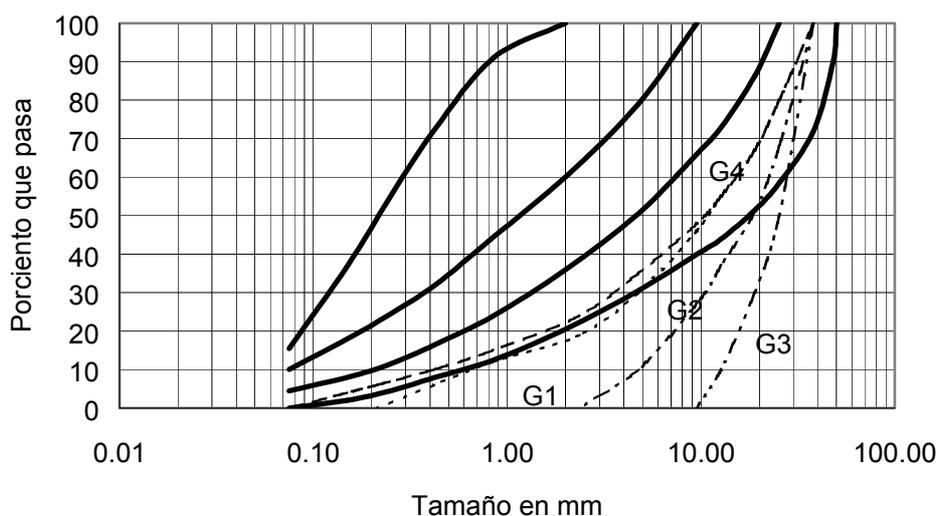


Figura 2.2 Materiales utilizados G1, G2, G3 y G4, ubicados en las zonas recomendadas por el IMT, para base de pavimento

2.3 Preparación de las muestras

Definidas las granulometrías a utilizar se procedió a la dosificación de las muestras mezclando las partículas de los diferentes tamaños, en la cantidad necesaria para obtener muestras de 50.0 kg de peso. Para la realización de los ensayos las diferentes muestras se colocaron dentro de un molde de dimensiones conocidas, en el cual el material es colocado en condición suelta o compacta. La variación en los pesos volumétricos obtenidos para las muestras de igual granulometría es poco significativa. Los valores medios se muestran en la Tabla 2.1.

Tamaño de la muestra de prueba

Estudios experimentales realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Marsal, 1972) sobre los efectos de escala, tanto en compresión unidimensional como del tipo triaxial, indican como adecuada una relación de diámetro de la probeta entre tamaño máximo del agregado de 8 a 10 veces $[(d_p/d_g) \geq 8.0]$.

Auvinet (1983), reporta resultados de una amplia investigación sobre efectos de escala en especímenes de materiales granulares, donde analizó la dispersión de parámetros como la porosidad, la relación de vacíos, el peso volumétrico y los porcentajes granulométricos cuando se hace variar la relación entre el diámetro de la muestra y el tamaño de las partículas del material, encontrando que una relación de diámetro de muestra a tamaño máximo de agregado de 10 es aceptable.

Tomando en cuenta las recomendaciones anteriores, en la elaboración de los especímenes para ensayos de carga cíclica se utilizó una relación de diámetro de la probeta a tamaño máximo de agregado de aproximadamente 8.0. Las dimensiones del molde de prueba son:

- Altura 50 cm
- Diámetro 30 cm
- Tamaño máximo del agregado 3.75 cm (1 1/2")

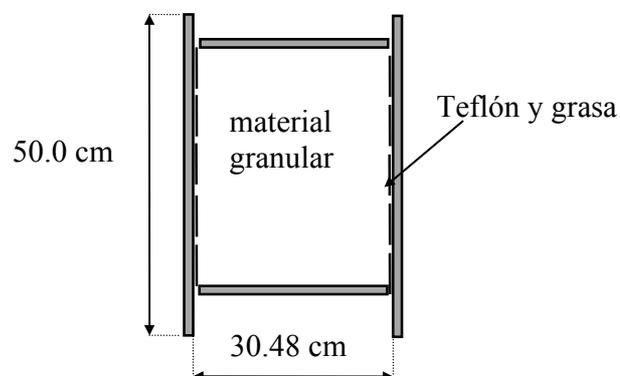


Figura 2.3 Dimensiones del molde de prueba utilizado

Colocación del material en el molde de prueba

Para disminuir la fricción entre el material de prueba y la superficie interior del molde, con lo cual se consigue una mejor distribución de los esfuerzos que se aplican a la muestra, se utilizaron placas de teflón de aproximadamente 5 x 5 cm, las cuales fueron colocadas en la pared interior del molde mediante una delgada película de grasa. Posteriormente, la muestra en estudio es colocada dentro del molde reproduciendo diferentes condiciones de compactación mediante la aplicación de golpes contra una base firme, o bien, en condición suelta. Los valores de pesos volumétricos secos sueltos o compactos iniciales fueron muy similares en los diferentes ensayos realizados. Sobre el material se coloca una placa de acero, ayuda a distribuir mejor las cargas aplicadas, posteriormente se toma la medida en cm entre la cara superior de dicha placa y el borde superior del molde, a fin de poder determinar la altura de la muestra de material, su volumen y peso volumétrico iniciales, relación de vacíos, porosidad, etc.

Frecuencia y tipo de onda utilizada

En el caso de los materiales que constituyen los pavimentos, éstos se ven sometidos a cargas dinámicas de magnitud variable. Cuando la rueda del vehículo se encuentra alejada del punto considerado, el esfuerzo en dicho punto es nulo; a medida que la rueda se acerca o avanza a velocidad constante el esfuerzo vertical se incrementa hasta llegar a un máximo que corresponde al momento en que la rueda se encuentra directamente sobre el punto considerado, al avanzar el vehículo, la rueda se aleja del punto, generando una disminución del esfuerzo vertical sobre el pavimento y reduciendo su magnitud hasta desaparecer completamente.

Es razonable considerar que la evolución de la magnitud del esfuerzo respecto al tiempo describa una onda tipo senoidal o triangular (Huang, 1993; Garnica et al 2000). El tiempo que dura la aplicación del esfuerzo depende de la velocidad de circulación del vehículo y de la profundidad del punto considerado en la estructura de pavimento.

En estudios realizados con materiales granulares (Seed H.B., et al, 1967), se ha observado que es posible la aplicación de cargas en pulsos con duración de 0.4 segundos, sin tener variaciones significativas en el comportamiento del material.

Con las consideraciones anteriores, para la aplicación de la carga dinámica se utilizó una onda senoidal, con una frecuencia de 1 Hz (1 ciclo por segundo), aplicando el esfuerzo en un tiempo de 0.4 segundos seguido de un periodo de reposo de 0.6 segundos. La Figura 2.4 muestra la onda utilizada en las pruebas de deformaciones permanentes.

Magnitud del esfuerzo aplicado y número de ciclos

Se utilizaron niveles de esfuerzo variables con el fin de cubrir ampliamente un rango de valores correspondiente a los esfuerzos que los diferentes tipos de vehículos inducen a las

capas de base y subbase de los pavimentos. Los valores van desde los 64 kPa hasta valores máximos de 1100 kPa. El número de ciclos utilizado también varió desde varias horas hasta pruebas de larga duración (aproximadamente 9 días), en las cuales la secuencia de cargas era ascendente o descendente. El número de ciclos de aplicación de la carga se fijó procurando que fuera el suficiente para lograr estabilizar la deformación permanente del material, como podrá apreciarse en las gráficas de número de ciclos contra deformación permanente que se muestran más adelante.

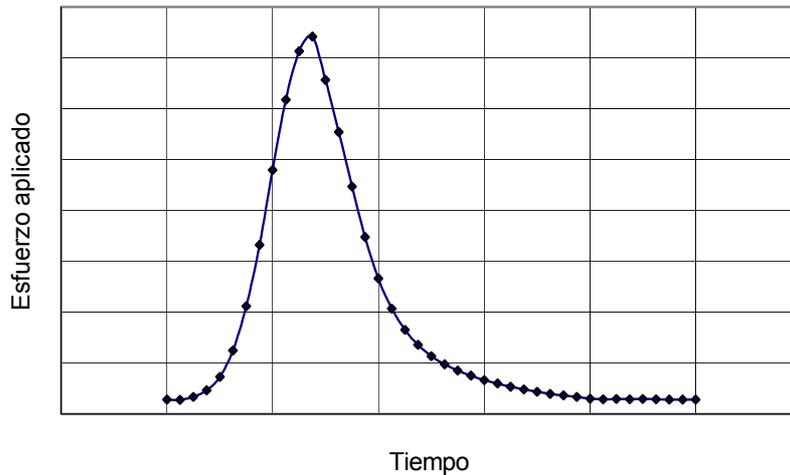


Figura 2.4 Tipo de onda utilizada en la aplicación de la carga cíclica

Descripción del equipo utilizado

Las pruebas de deformación permanente bajo carga cíclica se realizaron en una máquina servohidráulica INSTRON serie 8503. Esta máquina es de alta capacidad de respuesta pues responde con bastante precisión ante las cargas solicitadas, tomando en cuenta tanto la magnitud como la frecuencia. Toda la información que se genera durante el proceso de prueba (posición, tiempo, carga) es almacenada en el sistema de adquisición de datos, posteriormente es analizada con el fin de calcular las deformaciones de la probeta, su evolución con el tiempo y la magnitud de las cargas, etc.

2.4 Factores que influyen en la deformación permanente

Varios son los factores que influyen en las deformaciones permanentes que experimentan los materiales granulares cuando se encuentran formando parte de alguna de las capas de pavimento. Entre otros están, tipo de material, granulometría, magnitud del esfuerzo aplicado, etc.



Figura 2.5 Equipo Servohidráulico INSTRON serie 8503 con probeta de prueba

El número de repeticiones de carga aplicado

La Figura 2.6 muestra la evolución de la deformación permanente de una muestra de material con granulometría bien graduada (G1) a 20,000 ciclos con un esfuerzo vertical de 1074 kPa. En la gráfica se aprecia que la deformación total se desarrolla en 3 etapas: la primera ocurre rápidamente, es producto de las primeras decenas de ciclos de carga y representa aproximadamente el 70% de la deformación total; la segunda etapa corresponde a los siguientes 10,000 o 15,000 ciclos de carga y en ella se acumula casi la totalidad de la deformación; finalmente se desarrolla una etapa relativamente estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación alcanza prácticamente su valor máximo, lo que ocasiona que la aplicación de un número mayor de repeticiones de la carga ya no tenga prácticamente ningún efecto adicional.

Desde un punto de vista práctico, lo anterior implica que en una capa de material granular el período crítico de acumulación de deformaciones permanentes es de corto plazo y que para un nivel de esfuerzo dado, la magnitud de la deformación permanente que se genera es finita.

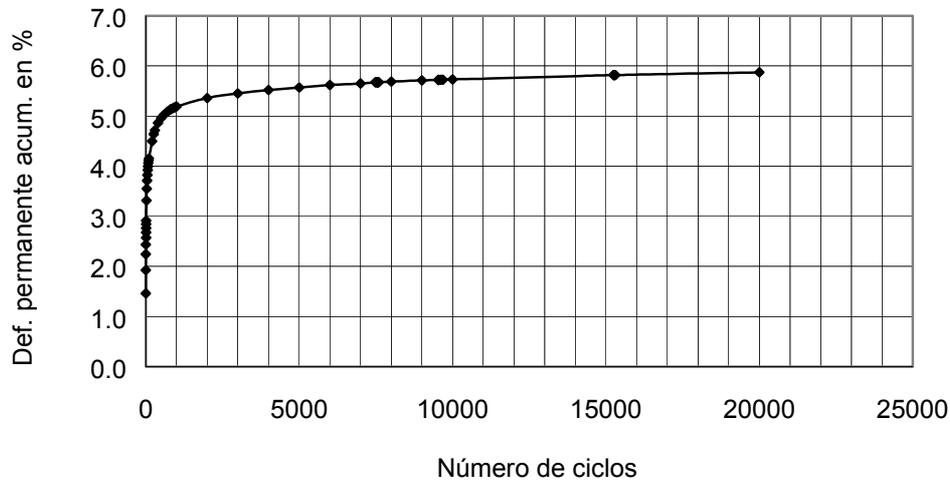


Figura 2.6 Evolución de la deformación permanente de un material granular contra el número de ciclos, para un esfuerzo vertical de 1074 kPa y granulometría G1

Efecto de la magnitud del esfuerzo aplicado

La magnitud de la deformación permanente que un material granular experimenta está marcadamente influenciada por el nivel del esfuerzo aplicado. La Figura 2.7 ilustra las deformaciones medidas en tres muestras de igual granulometría (material uniforme, G3) sometidas a esfuerzos cíclicos de 274, 547 y 1114 kPa.

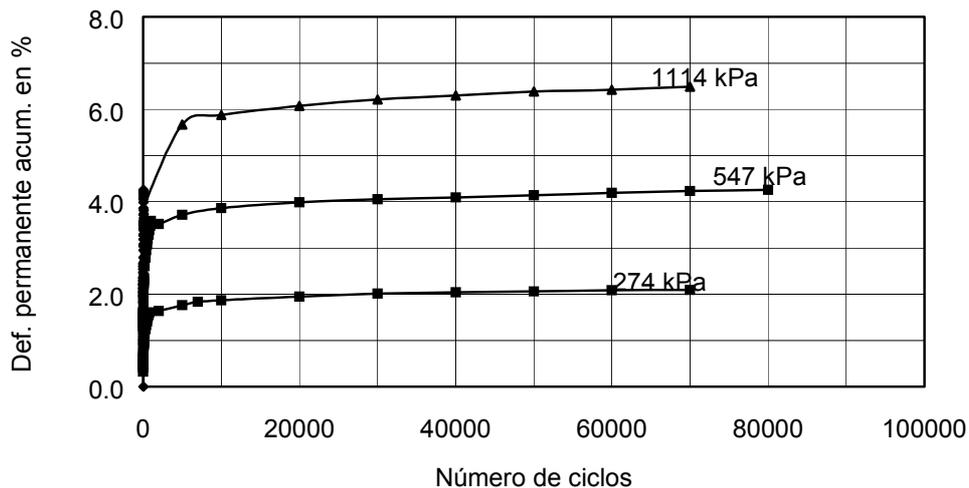


Figura 2.7 Evolución de la deformación permanente con el número de ciclos, para esfuerzos verticales de 274, 547 y 1114 kPa (material uniforme, G3)

La realización de pruebas con carga cíclica con aplicación sucesiva de incrementos o decrementos en la magnitud del esfuerzo, desarrolladas en una misma muestra y sin interrupción del proceso, permite observar con mayor claridad el efecto del nivel de la carga en la acumulación de la deformación permanente, notándose que dicha deformación depende fundamentalmente del máximo esfuerzo aplicado, independientemente de la aplicación de cargas previas o posteriores de menor magnitud.

En la Figura 2.8 muestra la evolución de la deformación permanente para una muestra sometida a una secuencia de esfuerzos de 547 y 1097 kPa; y el desarrollo de la deformación medida en otra muestra de igual granulometría sujeta a un esfuerzo constante de 1115 kPa repetido 255,000 veces. La Figura 2.9 ilustra el desarrollo de la deformación en una muestra sujeta a esfuerzos de 63, 126 y 253 kPa; y las mediciones hechas en otra muestra con la misma granulometría pero sometida a 64,800 repeticiones de un esfuerzo de 251 kPa (material uniforme, G3).

Puede observarse que la deformación permanente alcanzada en muestras sometidas a esfuerzos máximos de igual magnitud es similar, lo que parece indicar que, desde el punto de vista de las deformaciones permanentes, los materiales granulares no son sensibles a la historia previa de esfuerzos pero sí al nivel máximo de carga aplicado.

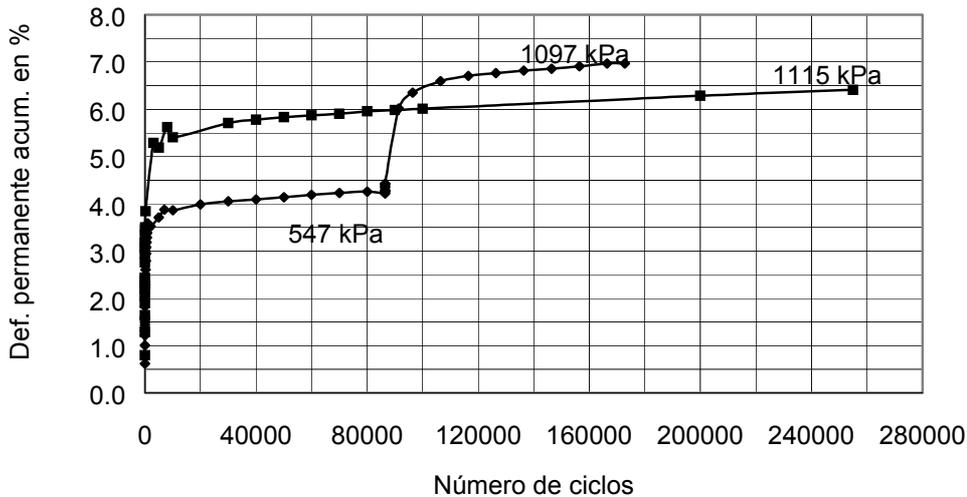


Figura 2.8 Evolución de la deformación permanente, para ensayos con secuencia de esfuerzos de 547 y 1097kPa (M4G3) y un esfuerzo vertical de 1115 kPa (material G3)

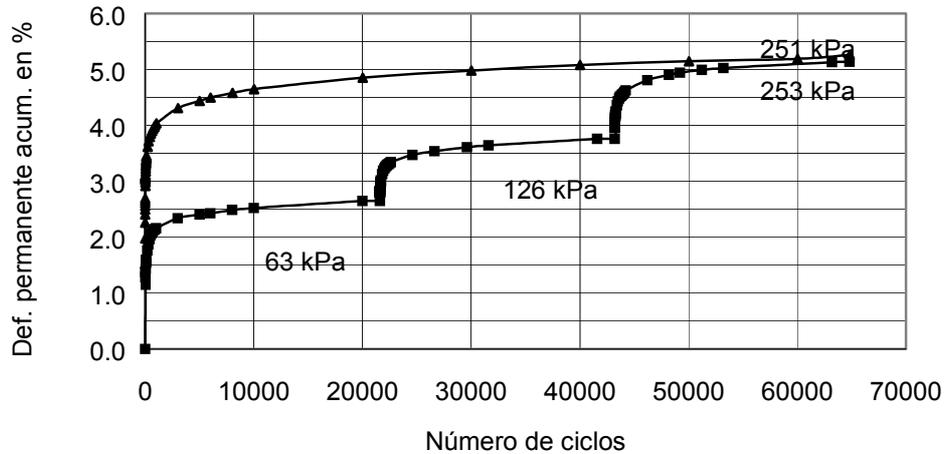


Figura 2.9 Evolución de la deformación permanente, para una secuencia de esfuerzos de 63, 126 y 253 kPa y un esfuerzo vertical de 251 kPa (material G1)

La importante influencia del nivel de esfuerzos en el desarrollo de la deformación permanente puede observarse también en la Figura 2.10, correspondiente a un ensaye en el que se aplicó una secuencia de esfuerzos de magnitud decreciente de 1073, 806, 543 y 275 kPa, incrementando enseguida el nivel a 539 y 806 kPa.

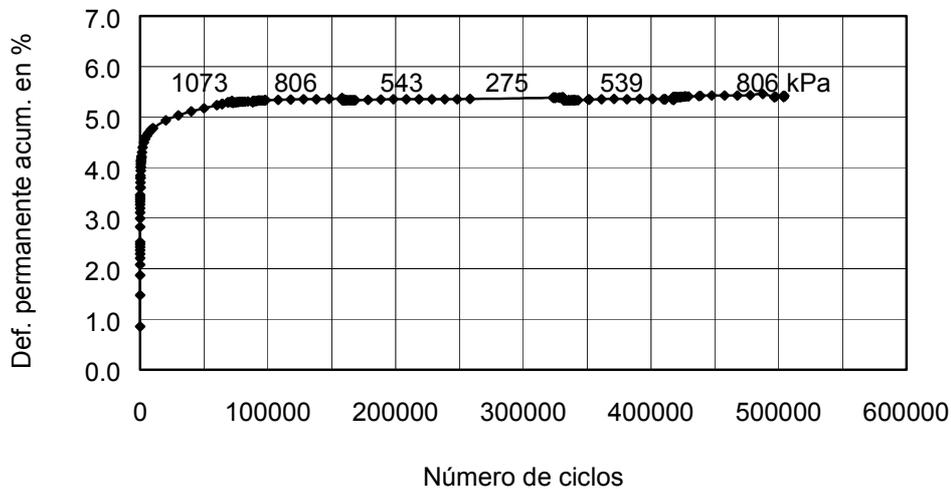


Figura 2.10 Evolución de la deformación permanente, para una secuencia de esfuerzos de 1073, 806, 543, 275, 539 y 806 kPa. (material G4)

La gráfica muestra como prácticamente la totalidad de la deformación permanente es producida por el primer nivel de esfuerzos, que corresponde al máximo, notándose que la aplicación posterior de esfuerzos menores incrementa la deformación de manera muy poco significativa. Lo anterior, implica que para fines de diseño de capas de materiales

granulares en pavimentos, la variable fundamental de diseño es el nivel máximo de esfuerzo aplicado.

Variación de la relación de vacíos con el nivel de carga aplicado

La relación de vacíos durante el ensaye de carga cíclica evoluciona en sentido inverso a como lo hace la deformación permanente. La Figura 2.11 ilustra dicha evolución.

A partir de una relación de vacíos inicial lograda mediante la preparación de la muestra, la relación decrece significativamente con la aplicación de los primeros ciclos de carga, alcanzando un valor prácticamente estable en los primeros miles de ciclos y tendiendo a su valor mínimo, gobernado principalmente por la granulometría del material. Esta observación es importante ya que al parecer (Aberg, 1995) esa relación de vacíos mínima es característica de una curva granulométrica dada.

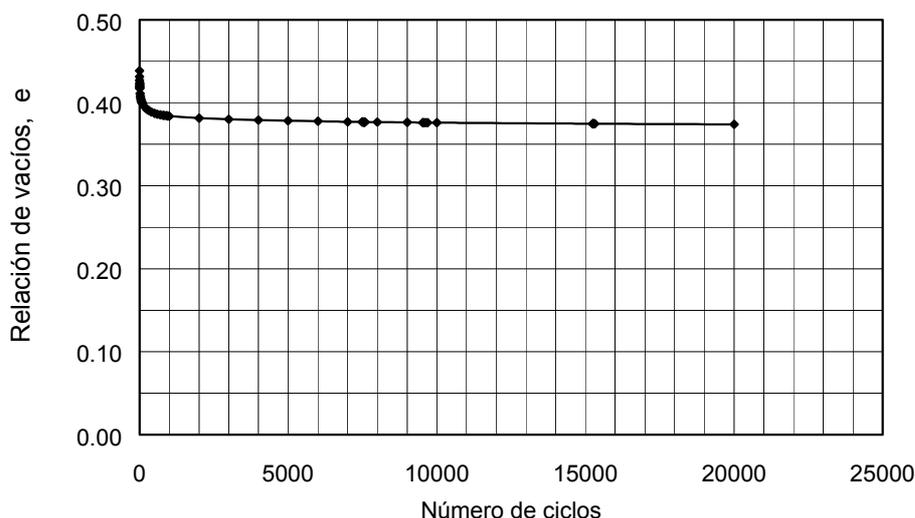


Figura 2.11 Evolución de la relación de vacíos de un material granular con el número de ciclos, para un esfuerzo vertical de 1074 kPa (material G1)

Influencia de la granulometría en la deformación permanente

La Figura 2.12 ilustra la evolución de la deformación permanente en 3 muestras con diferente granulometría, identificadas como G1, G2 y G3, las cuales fueron sometidas a cargas cíclicas de magnitud similar. Las curvas granulométricas correspondientes se muestran en la Figura 2.1. Es importante notar que las curvas identificadas como G2 y G3 corresponden a materiales mal graduados, mientras que la G1 pertenece a un material con buena graduación.

En la Figura 2.12 se indica la mayor deformación permanente total para el material G1, menor en el G2 y la más baja para el G3, esto a pesar de las características de graduación antes comentadas y a que los pesos volumétricos iniciales de las muestras G2 y G3 son menores que el de la G1, lo que parece indicar que el tener un peso volumétrico alto no garantiza una disminución en la magnitud de las deformaciones permanentes del material sujeto a cargas repetidas.

Una posible causa de la mayor deformabilidad de las muestras con granulometría G1 podría atribuirse a sus características de estabilidad interna ya que en el análisis efectuado se observó inestabilidad entre los tamaños de 2.36 mm y 0.215 mm, mientras que los materiales con G2 y G3 (uniformes) son estables en toda su masa.

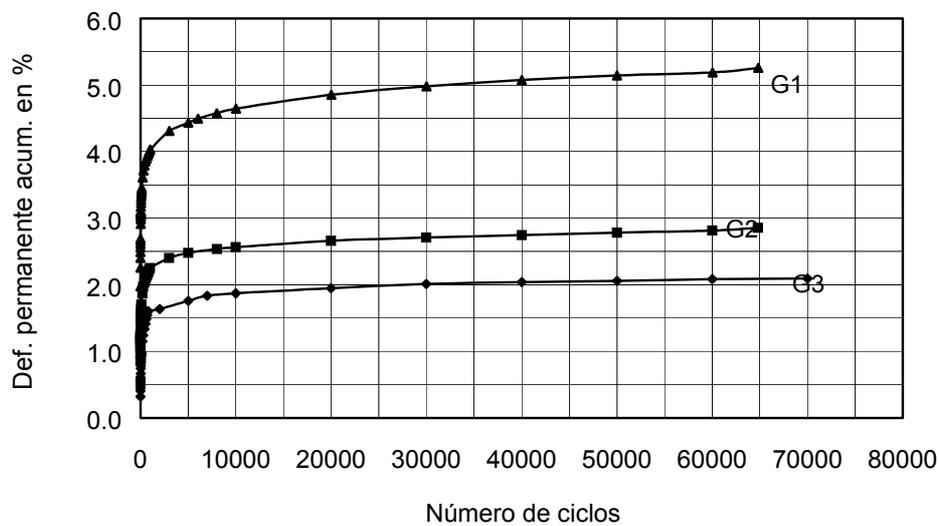


Figura 2.12 Evolución de la deformación permanente en muestras con diferente granulometría, sometidas a un mismo nivel de esfuerzos

Evolución de la deformación permanente con la magnitud del esfuerzo aplicado

En la Figura 2.13 se muestra la evolución de la deformación permanente con el nivel de esfuerzos aplicado, para materiales preparados con 4 diferentes granulometrías y con esfuerzos máximos del orden de 1100 kPa.

La deformación permanente se incrementa al aumentar el nivel del esfuerzo aplicado y tiende a un valor máximo para cada una de las granulometrías estudiadas.

Los valores máximos de deformación permanente corresponden al material con granulometría G1 mostrando valores del orden de 8.3%, para esfuerzos del orden de 1100 kPa. Por otro lado, los materiales con granulometrías G2, G3 y G4 alcanzan deformaciones máximas del orden de 7%, para esfuerzos de magnitud similar.

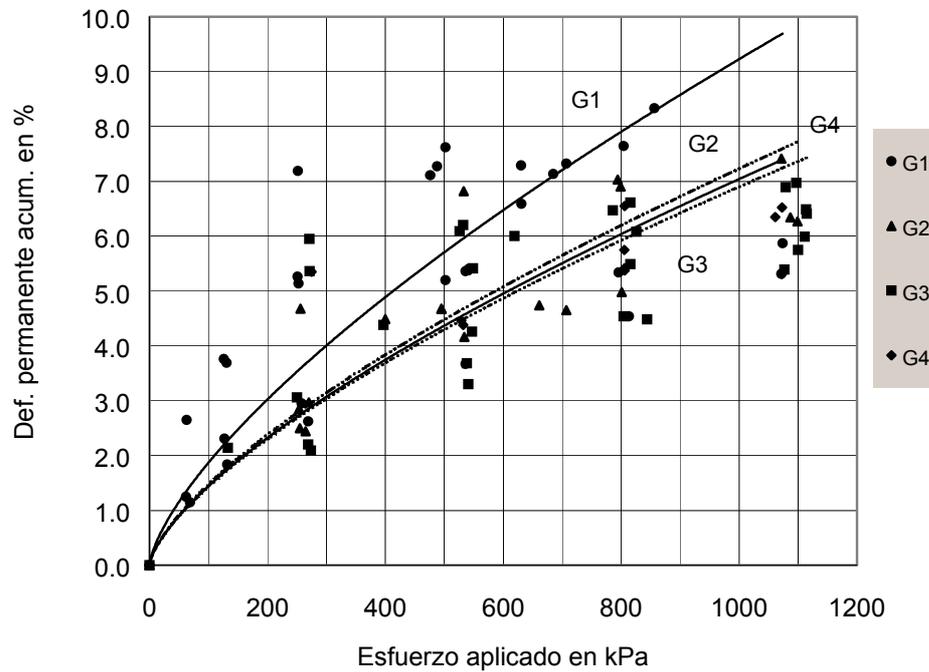


Figura 2.13 Evolución de la deformación permanente con el nivel de esfuerzos aplicados

Evolución de la relación de vacíos con la magnitud del esfuerzo aplicado

La Figura 2.14 muestra la variación de la relación de vacíos con el nivel de esfuerzos aplicado, para el material preparado con 4 diferentes granulometrías.

Puede observarse que la relación de vacíos disminuye al incrementar el nivel del esfuerzo aplicado, tendiendo a un valor mínimo asociado a cada una de las granulometrías.

Es importante notar cómo las dispersiones en el comportamiento se acentúan en los materiales mal graduados, identificados como G2 y G3.

Conviene señalar el hecho de que la ley de variación es de tipo exponencial, ya que el valor de la relación de vacíos no tiende a cero sino a un valor mínimo gobernado por las características granulométricas del material.

La relación de vacíos mayor corresponde al material con granulometría muy uniforme indicado como G3, dicha relación de vacíos va disminuyendo hasta valores del orden de 0.3 para el material mejor graduado, identificado como G4.

Así entonces, para una granulometría dada, existe una relación de vacíos mínima que corresponde a la máxima deformación que se puede esperar en el material para un nivel de esfuerzos dado.

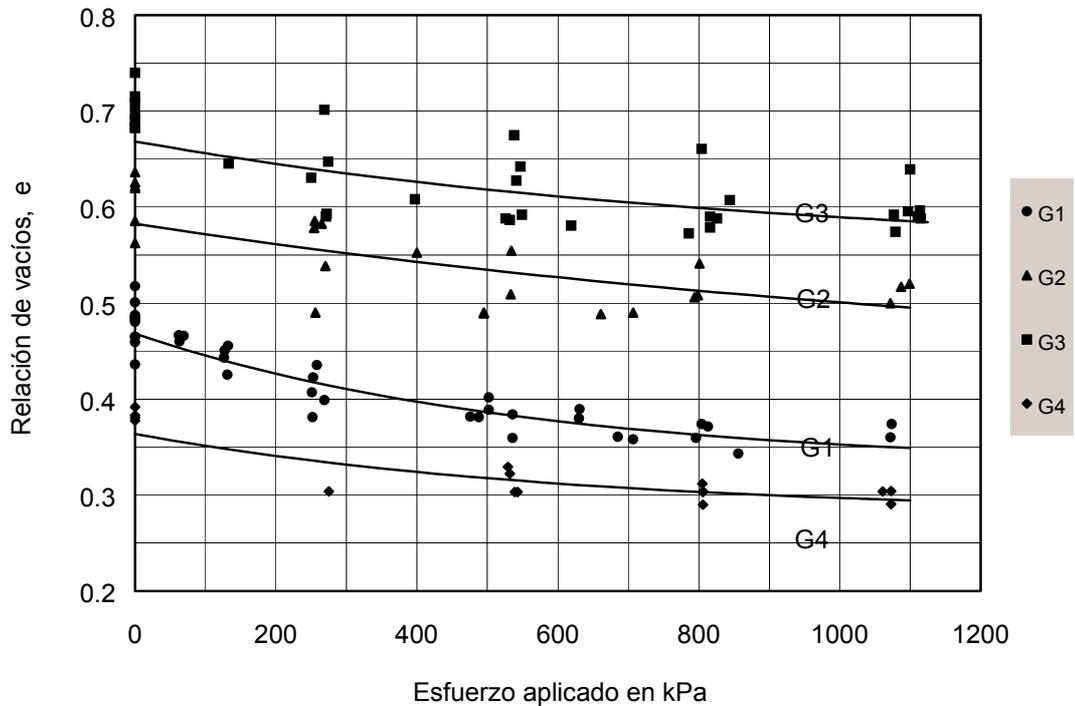


Figura 2.14 Evolución de la relación de vacíos con el esfuerzo aplicado, materiales con granulometría G1, G2, G3 y G4

Forma de aplicación de la carga en materiales granulares

Se realizaron ensayos como el de la Figura 2.15 a) en el que se muestra la deformación que experimenta un material granular que es sometido a un esfuerzo de 1100 kPa el cual es aplicado por una duración de 24 horas, en la figura se presenta cómo evoluciona la deformación que experimenta un material bien graduado (tipo G1). La deformación máxima alcanzada es de 5.52 %.

Después de aplicar la carga monotónica por espacio de 24 horas al material se le sometió a carga dinámica aplicándole en este caso un esfuerzo de 550 kPa por espacio de 24 horas y con una frecuencia de un Hertz. En la figura 2.15 b) se aprecia cómo se deforma el material hasta alcanzar valores de aproximadamente 3.7 %, además, la forma de la curva es diferente a las mencionadas anteriormente, pues el material ya estaba densificado.

Lo anterior, demuestra que la aplicación de esfuerzos repetidos con magnitud igual o menor que otro aplicado en condición estática pueden seguir deformando a los materiales granulares.

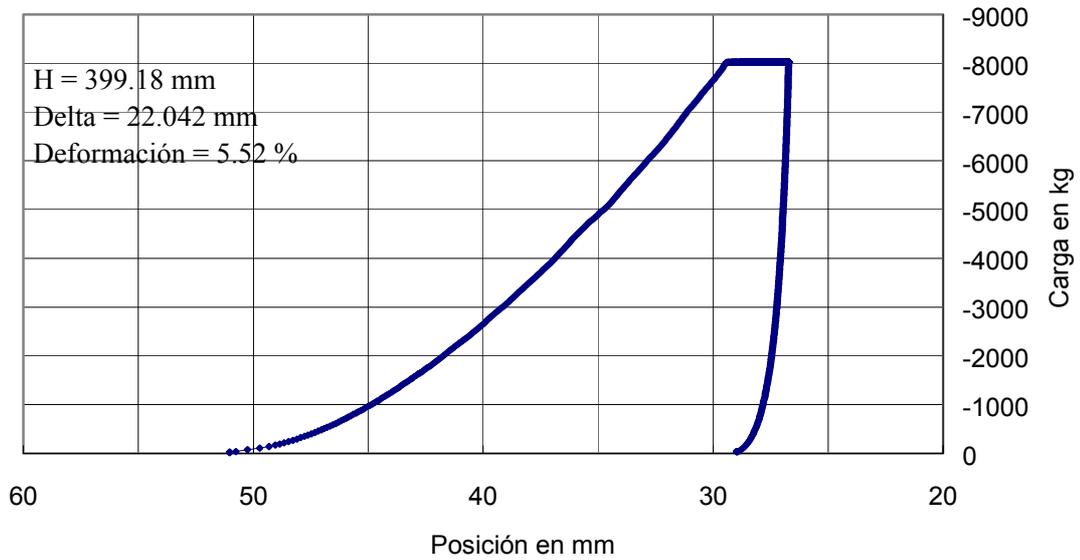


Figura 2.15 a) Deformación permanente en material granular (tipo G1) al cual se le aplicaron 1100 kPa en condición monotónica

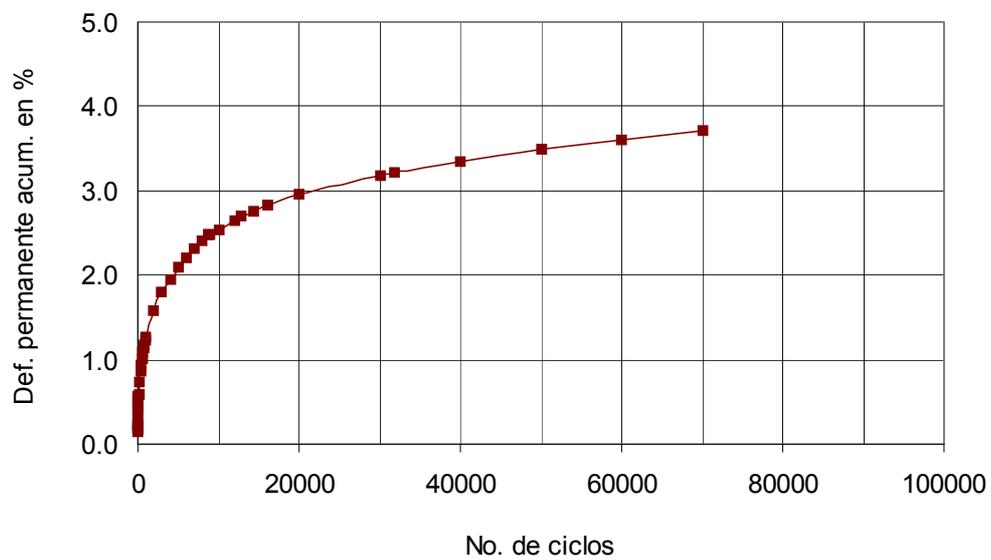


Figura 2.15 b) Ensaye dinámico con aplicación de 550 kPa material granular (tipo G1)

3 Conclusiones

En el empleo de materiales granulares compactados el paradigma de diseño debe estar enfocado hacia la deformación permanente y no tanto a la resistencia.

La compactación inicial de una capa define la deformación permanente máxima bajo un esfuerzo repetido.

La estabilidad de una capa granular bajo carga repetida parece ser mayor en granulometrías uniformes (menores contenidos de partículas de tamaños comparativamente pequeños) que en granulometrías bien graduadas. Este hecho parece inducir a la conveniencia de aplicar normas más estrictas en el sentido que se desprende de lo anterior, en las curvas que normalmente se aceptan en las especificaciones de construcción de casi todas partes.

Los resultados muestran que la deformación que experimenta un material granular queda definida por el esfuerzo máximo aplicado. Cualquier número de repeticiones adicionales de un esfuerzo menor posteriormente aplicado o cualquier secuencia de esfuerzos crecientes que llegue al máximo previamente ejercido ya no inducen deformaciones posteriores.

Las deformaciones permanentes que experimentan los materiales granulares cuando son cargados con esfuerzos cíclicos es mayor que cuando son cargados con esfuerzos monotónicos, aún y aunque las cargas sean de larga duración.

De todo lo anterior parece desprenderse un criterio que induzca a potenciar la compactación inicial de capas granulares sujetas a esfuerzos repetidos (caso de las carreteras) y a buscar granulometrías iniciales relativamente uniformes. Esta conclusión final parece inducir los criterios a buscar materiales gruesos en capas granulares, relativamente resistentes a la degradación bajo carga repetitiva.

Referencias

AASHTO (1992), "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46", AASHTO Designation: T294-92 I, Interim Specification 1992.

Aberg B, (1995), "Void Ratio of Noncohesive Soils and Similar Materials", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No. 9.

Alberro J., Marsal R. J. y Mendoza M. J., (1982), "Comportamiento de Suelos Cohesivos Compactados", Publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design of Pavement Structures", (1993), Washington, D.C., USA.

Auvinet G. G., (1983), "Efecto de Escala Geométrico en Medios Granulares", Publicación No. 473 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Bonaquist Ramón and Witzak Matthew W., "Plasticity Modeling Applied to the Permanent Deformation Response of Granular Materials in Flexible Pavement Systems", Transportation Research Record No. 1540.

Brown S.F. (1994), "Behavior of Layered Systems Under Repetitive Loading", XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India.

Brown, S.F., and E. T. Selig (1991), "The Design of Pavement and Rail Track Foundations", Cyclic Loading of Soils: From Theory to Design, Blackie and Sons Ltd., London; Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

Brown S.F. (1996), "Soil Mechanics in Pavement Engineering", The 36th Rankine Lecture of the British Geotechnical Society (1996), Géotechnique 46, No. 3, 383-426.

Carga Estatal de Suelos, INEGI, 1984.

Carta Estatal Geológica, INEGI, 1984.

Corro C. S., Prado O. G. (1985), "Comportamiento de bases granulares para carretera", Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Dar-Hao Chen, M.M. Zaman, and J. G. Laguros, "Resilient Moduli of Aggregate Materials: Variability Due to Testing Procedure and Aggregate Type", Transportation Research Record, No. 1462.

Garnica Anguas P. y Pérez García N. (2001). "Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos". Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica No. 165. Sanfandila, Qro.

Huang Yang H. (1993), "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

International Commission on Large Dams (ICOLD, 1994), "Embankment Dams Granular Filters and Drains", Bulletin 95, París.

Juárez B. E. y Rico R. A., (1987), "Mecánica de Suelos", Tomo II, Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos, Segunda Edición, Editorial Limusa, México.

Kamal M. A., Dawson A. R., Farouki O. T., Hughes D. A. B., and Sha'at A. A., "Field and Laboratory Evaluation of the Mechanical Behavior of Unbound Granular Materials in Pavements", Transportation Research Record No. 1406.

Karasahin M., A.R. Bawson, and J.T. Holden, "Applicability of Resilient Constitutive Models of Granular Material for Unbound Base Layers", Transportation Research Record, No. 1406.

Lanka Santha B., "Resilient Modulus of Subgrade Soils: Comparison of two Constitutive Equations", Transportation Research Record No. 1462.

Lekarp Fredrik, Ian Reginald Richardson, and Dawson Andrew, "Influences on Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials", Transportation Research Record No. 1547.

Marsal R. J., (1972), "Resistencia y Compresibilidad de Enrocamientos y Gravas", Publicación No. 306 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Nazarian S., Pezo R., Melarkode S., and Picornell M., "Testing Methodology for Resilient Modulus of Base Materials", Transportation Research Record, No. 1547.

M.H. Maher, W.J. Papp, Jr., and N. Gucunski, "Measurement of Soil Resilient Properties Using Noncontacting Proximity Sensors", Transportation Research Record No. 1548.

L. Von Quintus, Killingsworth, M. Darter, Owusu-Antwi, and Jiang, "Catalog of Recommended Flexible Pavement Design Features", Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 1998.

Orozco y Orozco J. M., "Selección de Materiales para la Sección Estructural de Carreteras y Vías Férreas", Tercera Reunión Hispano Mexicana de Técnicos en Vías Terrestres, México D.F., Octubre 1986.

Rico R. A., Orozco y O. J. M., Téllez G. R. y Pérez G. A. (1991), “Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros”, Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico No. 1, Sanfandila, Qro.

Rico Rodríguez A. y Del Castillo Mejía H., (1989), “La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres”, Volumen II, Editorial Limusa, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), “Normas de Construcción”, Muestreo y Pruebas de Materiales, Tomo IX, Parte Primera, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1986), “Normas de Calidad de los Materiales, Carreteras y Aeropistas”, Libro 4, Parte 4.01, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (1986), “Normas para Muestreo y Prueba de Materiales, Carreteras y Aeropistas”, Libro 6, Parte 6.01, México.

Seed H. B., Mitry F. G., Monismith C. L. and Chan C. K., (1967), “Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated-Load Tests”, Institute of Traffic and Transportation Engineering, Highway Research Board, University of California, USA.

Tiam Ping, Zaman Mushrraf M., and Laguros Joakim G.

Torres Velásquez R., “Capacidad Estructural de Pavimentos”, Revista Ingeniería Civil No. 336, Abril 1997, CICM.

Tutumluer Erol and Meier Roger W., “Attempt at Resilient Modulus Modeling Using Artificial Neuronal Networks”, Transportation Research Record, No. 1540.

Yoder E. J. and Witczak M. W. (1975), “Principles of Pavement Design”, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Zaman Musharraf, Dar-Hao Chen, and Laguros Joakim (1994), “Resilient Moduli of Granular Materials”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 6.